



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH KONSTRUKCE MODULU ROBOTICKÉHO RAMENA

DESIGN OF ROBOTIC ARM MODULE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Machala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mikuláš Szabari

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Lukáš Machala**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Mikuláš Szabari**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh konstrukce modulu robotického ramena

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student navrhne modul robotického ramena, který bude zkonstruován ve třech velikostech. Zejména tak, aby tyto moduly tvořily pohonnou část funkčního víceosého robotické ramena.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti konstrukci robotických ramen.
Rozbor řešené problematiky.
Vytvoření nejméně dvou návrhových variant, jejich hodnocení a výběr vhodné varianty na základě multikriteriální analýzy.
Konstrukční návrh vybrané varianty.
Návrhové výpočty.
Výkresová dokumentace vybraných dílu a výkres sestavy.
Ekonomické zhodnocení.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
KOLÍBAL, Zdeněk a Zdeněk KADLEC. Průmyslové roboty II. Konstrukce výstupních hlavic a periférií. Brno: PC DIR, 1993, 165 s. ISBN 80-214-0533-3.
SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

BUDA, Ján a Milan KOVÁČ. Priemyselné roboty. Bratislava: Alfa, 1976, 254 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Roboty modulární koncepce, kde jednotlivé moduly jsou konstrukčně i funkčně samostatné, postupně zaujímají čím dál větší procento na dnešním trhu. Tato práce obsahuje řešení v oblasti robotických ramen a dostupných modulárních koncepcí. V další části jsou, na základě výpočtů konstrukčních uzlů, vytvořeny moduly ve třech velikostech, které složením tvoří robotické rameno.

ABSTRACT

Robots of modular concept have each module functionally independent. They are continuously getting bigger representation on the market nowadays. This thesis contains research in the field of robotic arms and modular concepts. In the next part of the thesis, based on the calculations of structural nodes, were created modules in three sizes, which can be assembled into robotic arm.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotické rameno, modulární koncepce, harmonická převodovka, servomotor, elektromagnetická brzda.

KEYWORDS

Robotic arm, modular concept, harmonic gearbox, servomotor, electromagnetic brake.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHALA, Lukáš. *Návrh konstrukce modulu robotického ramena* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124253>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Mikuláš Szabari.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Mikuláši Szabarimu za věnovaný čas a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu. Zároveň bych rád poděkoval i svým přátelům za motivaci se zlepšovat, ať už na akademické půdě, tak i mimo ni.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Mikuláše Szabariho a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....
Machala Lukáš

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	16
3	HISTORIE ROBOTIKY	17
3.1	První stroje [1]	17
3.2	Definice PR.....	17
3.3	První robot ve výrobním procesu.....	17
3.4	Význam robotů	17
4	PRŮMYSLOVÝ ROBOT	18
4.1	Dělení PR a jejich struktur [4]	18
4.2	Charakteristiky PR [4]	20
4.3	Parametry PR na dnešním trhu	22
4.3.1	ABB IRB 1200	22
4.3.2	KUKA KR 30 R2100	22
4.3.3	ABB YuMi IRB 1400.....	23
4.3.4	AUBO i3.....	24
4.4	Pohony PR	25
4.4.1	Elektrický pohon [1].....	25
4.4.2	Hydraulický pohon [2].....	25
4.4.3	Pneumatický pohon [2].....	26
4.4.4	Kombinovaný pohon [1].....	26
4.4.5	Pohony SMA (Shape Memory Alloys)	26
4.5	Převody PR	27
4.5.1	Ozubené převody	27
4.5.2	Převodovky HARMONIC-DRIVE.....	27
4.5.3	Planetové převodovky [1].....	28
4.5.4	Převodovky CYCLO-DRIVE [11], [1]	28
4.6	Pohybové jednotky	30
4.6.1	Pohybové jednotky s přímočarým pohybem	30
4.6.2	Pohybové jednotky s rotačním pohybem [4].....	31
4.7	Přehled dostupných řešení modulů na trhu.....	32
4.7.1	Elfin E5.....	32
4.7.2	RDrive	32
4.7.3	LWR III	33
5	ROZBOR PRÁCE	34
5.1	Problémová situace	34
5.2	Formulace problému	34
5.3	Formulace cílů a řešení	34
5.4	Popis řešené soustavy	34
5.5	Systém podstatných veličin	35
6	NÁVRHOVÉ VARIANTY	36
6.1	Varianta 1.....	36
6.1.1	Výhody a nevýhody varianty 1.....	36
6.2	Varianta 2.....	37
6.2.1	Výhody a nevýhody varianty 2.....	37

7	MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA VARIANT	38
7.1	Parametry hodnocení	38
7.2	Přirazené váhy parametrům	38
7.3	Hodnocení varianty 1	39
7.4	Hodnocení varianty 2	40
7.5	Výběr varianty	40
8	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	41
8.1	Stanovení vstupních parametrů	41
8.2	Výběr pohonu	41
8.3	Výběr převodovky	43
8.4	Výběr brzdy	44
8.5	Úplné uvolnění hřídele	45
8.5.1	Vyjádření kroutících momentů na hřídeli	45
8.5.2	Kritické zatížení hřídele radiální silou	45
8.6	Kontrola per na otláčení	48
8.7	Volba senzorů	49
8.8	Volba řídicí jednotky	49
8.9	Popis mechanismů	50
8.10	Popis montáže modulu	51
9	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	52
10	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	53
10.1	Možné pokračování	53
10.2	Využití v praxi	53
11	ZÁVĚR.....	54
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
13	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	57
13.1	Seznam použitých symbolů a zkratk	57
13.2	Seznam tabulek.....	58
13.3	Seznam obrázků.....	59
14	SEZNAM PŘÍLOH.....	61
	PŘÍLOHY	63

1 ÚVOD

Robotická ramena nebo také průmyslové roboty jsou univerzálními nástroji ve světě průmyslu. Byly vyvinuty za účelem zvýšení produktivity, kvality a snížení výdajů. Také nahrazují pracovníka tam, kde hrozí nehody nebo by byli lidé vystaveni škodlivému prostředí. V dnešní době je na trhu široké spektrum robotických ramen, na výběr jsou roboty různých typů s různým počtem os a různě velkou nosností nákladu. Modulem robotického ramena můžeme rozumět takovou část, která je zodpovědná za vykonávání příslušných pohybů. Sestavením více modulů vzniká robotické rameno. Modulární průmyslové roboty jsou velice flexibilní a umožňují různorodé sestavení jednotlivých dílů a modulů. Zpravidla se vyznačují nižšími náklady při konstruování, výrobě a testování díky vyšší sériovosti.

V první části práce je zhotovena rešerše, kde jsou popsány základní charakteristiky robotických ramen. Poté následuje rozbor konstrukčních prvků, a to zejména pohonů a převodovek. Jako poslední v této části práce je zhotoven rozbor dostupných řešení modulárních robotů na trhu.

V druhé části práce je cílem návrh konstrukce modulů pro robotická ramena. Kapitola začíná stanovením dvou návrhových variant, které jsou zhodnoceny podle osmi parametrů. Klíčové uzly vybrané varianty jsou pak vypočítány a podle výsledků navrhnuty. Tato práce končí zhodnocením dosažených výsledků.

2 MOTIVACE

Toto zadání bakalářské práce jsem si vybral, jelikož vidím velký potenciál v průmyslové automatizaci a robotická ramena tvoří velké procento v tomto odvětví. Při zpracování tohoto tématu mohu uplatnit nabyté znalosti ze studia a zároveň je rozšířit. Dalším kritériem volby byl ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, na kterém bych chtěl pokračovat v navazujícím studiu.

3 HISTORIE ROBOTIKY

3.1 První stroje [1]

První pokusy o vytvoření strojů, které by byly podobné živým tvorům, sahají daleko do minulosti. Avšak jako prvotní myšlenku o robotech můžeme připisat Homérovi, který ve svém hrdinském eposu Ilias popisuje sluhly vykované z čirého zlata sloužící na hoře Olymp. Jedním z nejznámějších techniků a géníů byl Leonardo da Vinci, ten pro uvítání krále Ludvíka XII. sestrojil mechanického lva, který kráčel k jeho trůnu a zvednutím tlapy pozdravil krále. Historie se ale neobejde bez podvodníků, kteří vytvořili pouhou iluzi fungujícího stroje. Příkladem je Kempelenův „Turek“, který obsahoval velké množství převodů a ozubených kol. Ve skutečnosti vše obsluhoval člověk schovaný v útrokách stroje.

Slovo „robot“ použil poprvé spisovatel Karel Čapek, a to ve svém dramatu R.U.R z roku 1921. Je odvozeno z výrazu robota, které má v češtině význam těžké a nepříjemné práce. Toto slovo mu poradil jeho bratr, Josef Čapek. S rostoucí popularitou Čapkova dramatu se rozšířilo toto slovo po celém světě.

3.2 Definice PR

Automatický stroj představující manipulátor s přeprogramovatelným řídicím systémem na vykonávání pohybových a řídicích funkcí ve výrobním procese, které nahrazují analogické funkce člověka při přemísťování předmětů výroby a technologii výroby. Po změně programu, koncového efektoru anebo pracoviště je schopen vykonávat jinou operaci. Může být vybaven senzory, kterými komunikuje s řídicím systémem [15].

3.3 První robot ve výrobním procesu

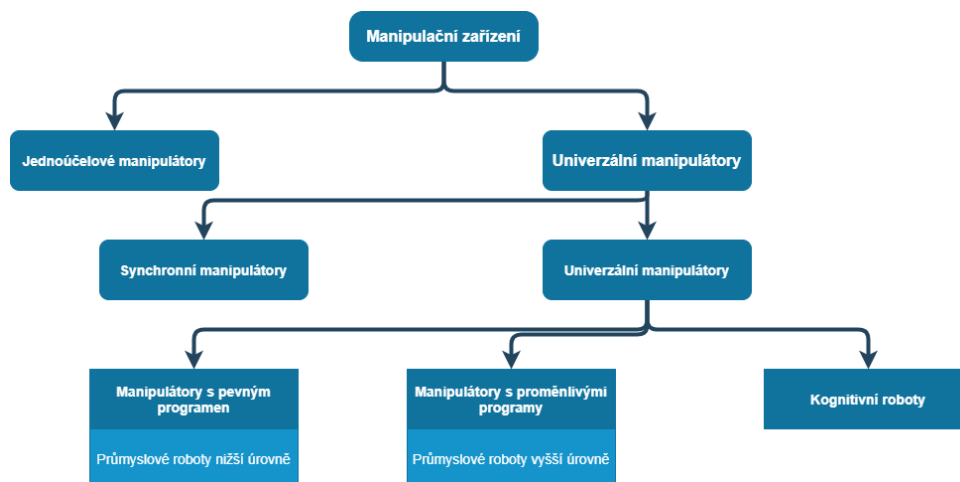
V 60. letech 20. století představila americká firma AMF mnohoúčelový automat jménem „průmyslový robot VERSATRAN“. Jednalo se spíše však o automat, který byl schopný vykonávat práci člověka, ale neměl jeho podobu. Zhruba ve stejné době vytvořila další americká firma Unimation stroj pod názvem „průmyslový robot UNIMATE“, ten dnes představuje jeden z nejlepších typů průmyslových robotů na světě. Ve výrobě je nejčastějším robotem průmyslový robot, který může být použit pro mnoho technologických procesů jako např. svařování, lakování a manipulace s objekty [1].

3.4 Význam robotů

Vývoj lidstva a techniky neustále klade důraz na vylepšování výrobních procesů a technologií. To můžeme vidět v oblasti automatizace, která zaznamenává stabilní růst, a to díky poptávce průmyslových robotů a manipulátorů, kteří dokážou zvýšit produkci, zvýšit kvalitu a snížit náklady. Také je neustále zvyšovaný požadavek na bezpečí pracovníků, a proto jsou nasazovány průmyslové roboty tam, kde hrozí zvýšené riziko úrazu [2].

4 PRŮMYSLOVÝ ROBOT

Průmyslové roboty jsou komplexní technické systémy, které spadají do kategorie univerzálních manipulátorů. Do této kategorie také patří například synchronní manipulátory, tyto mechanismy představují zesilovací ústrojí, kterým řídící pracovník ovládá manipulátor a tím tvoří uzavřenou regulační smyčku. Roboty pak dále můžeme dělit podle způsobu řízení, kdy zařízení pracuje podle předem daného programu, který je stálý a neměnný, anebo mají možnost přepínání programu, a tak reagovat okamžitě na dané situace, ve kterých se roboty zrovna nacházejí [2].



Obr. 1) Rozdělení manipulačních zařízení [2]

4.1 Dělení PR a jejich struktur [4]

Roboty můžeme klasifikovat podle různých kritérií – podle počtu stupňů volnosti, kinematické struktury, použitých pohonů, geometrie pracovního prostoru, pohybových charakteristik, způsobu řízení, způsobu programování.

Klasifikace podle kritérií:

1. Počtu stupňů volnosti robotu

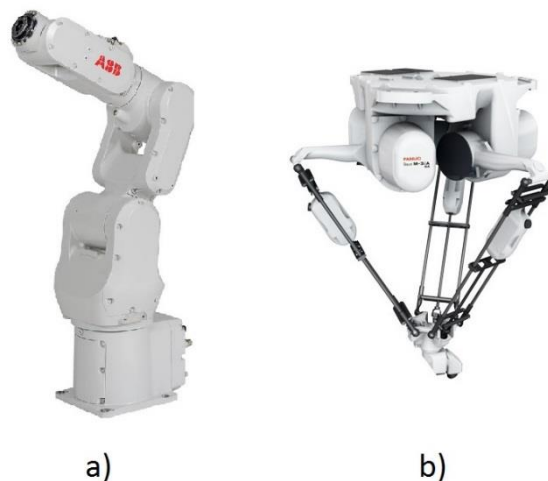
- Univerzální robot – právě 6 stupňů volnosti
- Redundantní robot – více jak 6 stupňů volnosti
- Deficitní robot – méně jak 6 stupňů volnosti

2. Podle nosnosti

- Velmi lehký do 1 kg
- Lehký do 10 kg
- Střední do 100 kg
- Těžký do 1 000 kg
- Supertěžký nad 1 000 kg

3. Podle kinematické struktury

- Sériové roboty – s otevřeným kinematickým řetězcem manipulátoru
- Paralelní roboty – s uzavřeným kinematickým řetězcem manipulátoru
- Hybridní roboty – kombinující oba řetězce



Obr. 2) a) ABB IRB 1100 – sériový robot [5] b) FANUC M-3 – paralelní robot [6]

4. Podle druhu pohonů

- Elektrické
- Hydraulické
- Pneumatické
- Kombinované

5. Podle geometrie pracovního prostoru

- Kartézské
- Cylindrické
- Sférické
- Angulární
- Scara

6. Podle kompaktnosti konstrukce

- Univerzální
- Modulární (modulové)

4.2 Charakteristiky PR [4]

Typ průmyslového robota lze popsat několika charakteristikami, které určují rozsah jejich použitelnosti, způsobu řízení a technických parametrů aj. Tyto charakteristiky a vlastnosti konkrétních robotů jsou k dispozici v technických dokumentacích a manuálech dodávaných při zakoupení robota konkrétní firmou.

1. **Geometrické charakteristiky** – soubor parametrů, určujících geometrické vlastnosti jednotek, uzlů a systémů robotů
 - Pracovní prostor – prostor určený tvarem a objemem, který opíše referenční bod pracovní hlavice využitím všech možností pohybového systému
 - Provozní prostor – prostor určený tvarem a objemem, který vyplní konstrukce robota v rámci své činnosti při využití všech pohybových možností
 - Opakovaná přesnost polohování
2. **Statické charakteristiky** – soubor parametrů, určujících statické projevy pohybového systému robota jako celku.
 - Statická tuhost
3. **Kinematické charakteristiky** – soubor parametrů, určujících kinematické vlastnosti jednotlivých pohybových jednotek a pohybového systému robota jako celku.
 - Kinematická struktura
 - Rychlost
 - Zrychlení
4. **Dynamické charakteristiky** – soubor parametrů, určujících dynamické vlastnosti jednotlivých pohybových jednotek a pohybového systému robota jako celku.
 - Dynamická tuhost
 - Dynamické síly a momenty
5. **Výkonové charakteristiky** – soubor parametrů, určujících výkon a energetickou náročnost při určitých provozních podmínkách.
 - Jmenovitá nosnost
 - Nosnost vztahovaná k přesně specifikovaným provozním podmínkám
 - Nosnost při 50% rychlosti
 - Nosnost při 30% rychlosti
 - Soubor parametrů, které charakterizují rozložení energie v jednotlivých pohybových jednotkách
6. **Provozní charakteristiky** – soubor parametrů, určujících základní vlastnosti robota s ohledem na parametry pracovního prostředí a charakter aplikace
 - Montážní poloha
 - Celková hmotnost konstrukce
 - Celkový instalovaný výkon – součet maximálních hodnot všech výkonů konstrukce
 - Provozní příkon
 - Spotřeba energie – celková spotřeba energie za 1 hodinu
7. **Charakteristika spolehlivosti** – soubor parametrů, které vyjadřují spolehlivost a životnost robota

- Životnost fyzická – čas po který je robot schopen dodržovat předepsané parametry provozu
 - Životnost morální – čas po jehož uplynutí zaostává robot ve všech sledovaných parametrech za nově vyráběnými typy srovnatelného funkčního určení
 - Střední hodnota bezporuchové činnosti – čas určený aritmetickým průměrem z jednotlivých časových úseků bezporuchové činnosti během celkové doby efektivního provozu
8. **Poměrové charakteristiky** – soubor bezrozměrných parametrů určených poměrem vybraných parametrů různých charakteristik
- Poměrná hmotnost – poměr nosnosti robotu a celkové hmotnosti konstrukce
 - Poměrná energetická náročnost provozního příkonu k hmotnosti objektu manipulace
 - Poměrný provozní prostor – poměr objemu provozního a pracovního prostoru
 - Poměrná operační rychlost – poměr maximální pracovní rychlosti k jmenovité nosnosti
9. **Charakteristika řízení**
- Způsob řízení pohybu – PTP (point to point), MP (multipoint), CP (continuous path)
 - Délka programu – počet programovatelných bodů
 - Časové trvání
10. **Charakteristika konstrukce**
- Koncepce
 - Typ pohonu
 - Typ řídicího systému a rozsahu senzorického vybavení
11. **Cena**

4.3 Parametry PR na dnešním trhu

Společnosti na celém světě nabízí široké spektrum průmyslových robotů. Trendem na dnešním trhu je nasazování robotů ke zvýšení produktivity, kvality a bezpečnosti práce.

4.3.1 ABB IRB 1200

Flexibilní, rychlý a malý, tak by se dala označit vlajková loď společnosti ABB v oblasti průmyslových robotů. Je dodáván ve dvou variacích, první s dosahem 703 mm a nosností až 7 kg a druhá s dosahem 901 mm a nosností do 5 kg. Standardně jsou tyto roboti dodáváni s ochranou IP40 což může být nevýhodou, z hlediska neodolnosti vůči kapalinám. Ale na objednávku je možné je dodat s ochranou IP67, což je druhá nejvyšší ochrana vůči vodě a nevyšší vůči cizím předmětům jako je třeba prach [9].

Parametry:

- Dosah 901 mm
- Zatížení 7 kg
- Upevnění robotu – v jakémkoli úhlu
- Stupeň krytí c IP40/IP67
- Váha 54 kg



Obr. 3) ABB průmyslový robot IRB 1200 [9]

4.3.2 KUKA KR 30 R2100

Tento robot spadá do série robotů KUKA IONTEC, a díky digitálním „Motion Modes“ můžete výkon robota přizpůsobit různým procesům. Společnost urazila dlouhou cestu, nyní aktuální model potřebuje o 50 % méně náhradních dílů než jeho předchůdce [12].

Parametry:

- Dosah 2100 mm
- Zatížení 30 kg
- Upevnění robotu – v jakémkoli úhlu
- Stupeň krytí – IP65/IP67
- Váha – 533 kg



Obr. 4) KUKA KR 30 R2100 [12]

4.3.3 ABB YuMi IRB 1400

Zajímavým průmyslovým robotem je kooperující robot YuMi, první spolupracující robot od společnosti ABB se dvěma pažemi. Název tohoto robota vychází ze dvou anglických slov „you“ (ty) a „me“ (já). Jeho aplikace je cílená na prostředí montáže drobných součástek. Jeho úkolem je podávání součástek, lokalizace součástek založená na kamerovém systému a strojové učení. Výsledkem této kolaborace stroj-člověk má být využití potenciálu robota a zachování motorické kontroly člověka [10].

Parametry:

- Dosah 500 mm
- Zatížení 500 g
- Upevnění robota – stůl
- Stupeň krytí – IP30
- Váha 38 kg



Obr. 5) ABB kooperující robot YuMi 14000 [10]

4.3.4 AUBO i3

AUBO i3 je modulární kloubový robot pro jemnou manipulaci v místech s omezeným množstvím prostoru a požadavky na vysokou přesnost práce. Značka pochází z východní Asie, ale na návrhu robotů se nyní podílejí odborníci z celého světa [14].

Parametry:

- Dosah 625 mm
- Zatížení 3 kg
- Upevnění robotu – stůl
- Stupeň krytí – IP54
- Váha 15,5 kg



Obr. 6) AUBO i3 [14]

4.4 Pohony PR

Pohybové úkony v jednotlivých souřadnicových osách jsou odvozeny od výstupů pohonů. V současné době rozlišujeme tyto pohony:

1. Elektrický pohon
2. Pneumatický pohon
3. Hydraulický pohon
4. Kombinovaný
5. Pohony SMA

Každý typ pohonu má své klady i zápory, které musíme zohlednit při řešení konstrukce podle zadaných parametrů a podle charakteru předpokládané aplikace [2].

4.4.1 Elektrický pohon [1]

V dnešní době mají rotační elektrické pohony prioritní postavení ve srovnání s pohonem hydraulickým a pneumatickým. Značnou nevýhodou je složitější provedení přímočarých pohybů jednotlivých os. Z důvodu větších rozměrů elektromotoru, než je hydromotor o stejném výkonu, se u průmyslových robotů velkých výkonů dává přednost hydraulickému pohonu.

Typy elektromotorů:

- Elektrické motory rotační
- Elektrické servomotory
- Motory s elektronickou komutací
- Lineární elektromotory
- Krokové motory

Tyto pohony jsou hromadně vyráběny a jsou konstruovány pro použití i u jiných zařízení. Jejich výhodou je snadný rozvod energie a přístup z veřejné sítě. Na rozdíl od hydraulických a pneumatických pohonů, není potřeba převodníků energie, a tak dochází k jednoduššímu spojení s řídicími systémy.

Nejdůležitějším požadavkem kladeným na tyto pohony je spolehlivost, protože roboty jsou z pravidla součástí velkých výrobních systémů.

4.4.2 Hydraulický pohon [2]

Díky nízkému poměru hmotnosti a výkonu je hydraulický pohon základním typem pohonu těžkých PR s vyššími nosnostmi. Výhodami můžeme považovat velkou tuhost, snadné řízení tlaku i proudu kapaliny a možnost dosažení malých rychlostí pohybu bez převodů.

Hydraulické pohony jsou považovány za velmi spolehlivé s vysokou účinností, avšak vyžadují zvýšenou péči při údržbě.

Největší nevýhodou je změna viskozity pracovní kapaliny, která je závislá na teplotě. To vede ke změně tlakových poměrů. Mezi další nevýhody se řadí hořlavost pracovních kapalin a poměrně těžké dosažení vyšších pohybových rychlostí.

V hydraulických pohonech se používají tyto typy hydromotorů:

- Rotační
- S přímočarým pohybem (hydraulické válce)
- S kývavým pohybem

Rotační hydromotory můžeme rozdělit podle způsobu vytvoření geometrického objemu

na:

- Zubové
- Lamelové
- Šroubové
- Pístové

Největší výhodou rotačních hydromotorů ve srovnání s elektromotory je snadnější a plynulejší regulace otáček ve velkém rozsahu, malé rozměry a tím i malá hmotnost.

4.4.3 Pneumatický pohon [2]

Tento pohon je u PR vhodný zejména pro jednodušší pracovní cykly a menší výkony do 1kW. Výkon je limitován nejvíce pracovním tlakem, který se pohybuje v desetinách MPa. Pneumatické mechanismy s větším tlakem se zatím nepoužívají. Ve srovnání s hydraulickým pohonem je pneumatický pohon rychlejší a umožňuje měkčí rozběh. Pneumatické pohony umožňují dosažení rychlostí až 3 m/s u přímočarých pohybů, málokdy se ale takové pohony vůbec nedají využít důvodu obtížného brždění a velkých setrvačných sil.

Největší výhodou je možnost dosažení rychlých přímočarých pohybů s velkými zdvihy. Díky konstrukční jednoduchosti jsou tyto mechanismy velice spolehlivé a umožňují jednoduchý rozvod energie bez zpětného odvádění vzduchu z motoru. Některé roboty jsou nasazovány tam, kde je to po člověka nebezpečné, a proto jsou pneumatické systémy využívány v oblastech s nebezpečím vznícení, ve výbušném prostředí a ve velkých teplotních rozdílech. Největší nevýhodou je obtížné udržení rovnoměrného pohybu a obtížné řízení rychlosti pohybu a polohy zastavení.

4.4.4 Kombinovaný pohon [1]

Kvůli využití dobrých vlastností jednotlivých pohonů vznikli pohony kombinované, které vznikají vhodným spojením prvků různých pohonů a spojení těchto vlastností do jediného pohonu. I přes libovolné spojení pohonů elektrických, hydraulických a pneumatických, v praxi má využití pouze elektrohydraulický a pneumohydraulický pohon.

V případě pneumohydraulického pohonu dochází k doplnění pneumatického motoru hydraulickým obvodem, v tom je použito řízení rychlosti a polohy zastavení. Takovéto spojení většinou bývá provedeno přes škrtkový ventil, jímž se řídí přepouštění kapaliny. Takovéto motory musí být vybaveny pomocnou vyrovnávací nádrží, která také doplňuje ztráty kapaliny.

U elektrohydraulických pohonů je na vstupu elektromotor a na výstupu hydromotor, využívá se zde jednoduchého spojení elektromotoru s řídicími systémy a výhodným vlastnostem hydromotorů. Způsob spojení těchto pohonů je řešen tak, že k přenosu pohybu od elektromotoru na hydromotor dochází v definovaném poměru natočení. Podstatnou vlastností je tedy polohová zpětná vazba. Elektromotor plní tedy řídicí funkci a hydromotor sleduje jeho pohyb.

4.4.5 Pohony SMA (Shape Memory Alloys)

Slitiny s tvarovou pamětí řeší problém pohonu miniaturních manipulátorů a robotů. Tento nekonvenční způsob přeměny energie na mechanický pohyb je realizovatelný díky změnám tvaru v závislosti na teplotě. Slitiny s tvarovou pamětí představují skupinu tzv. inteligentních materiálů [1].

4.5 Převody PR

Převody jsou důležitými stavebními kameny všech průmyslových robotů, jejichž aplikace najdeme ve všech ústrojích robotů – pojezdovém, polohovacím, orientačním i v efektoru. Aplikace převodů je převážně spojena s elektrickými servomotory. Jejich hlavním úkolem je redukce otáček a zvýšení momentů od motoru k ramenu robotu. V případě, že je motor mimo kloub, který pohání, pak slouží k přenosu pohybu do daného kloubu., v takovém případě je převodový poměr $i = 1$ [4].

Rozdělení převodů:

- Ozubené převody
- Převodovky HARMONIC-DRIVE
- Planetové převodovky
- Převodovky CYCLO-DRIVE

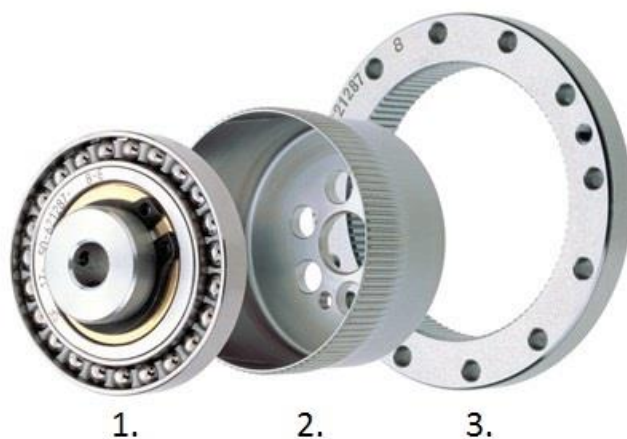
4.5.1 Ozubené převody

Využití ozubených kol v konstrukcích průmyslových robotů je velmi časté, nejvíce v pohybových jednotkách, rotačních a translačních. Vyskytují se zde v podobě jednoduchých soukolí s čelními koly, ale také například jako kuželové soukolí [4].

4.5.2 Převodovky HARMONIC-DRIVE

Harmonická převodovka se skládá ze tří částí, eliptického generátoru vln, pružného kola a tuhého ozubeného kola. Generátor vln je speciální a velmi tenké kuličkové ložisko, které je připevněno na eliptickou vačku. Pružné kolo je válec s pevným dnem vyrobený z legované oceli s vnějšími zuby na otevřeném konci válce. Poté co je do něj vložen generátor vln, převezme jeho eliptický tvar. Toto pružné kolo je připojeno k výstupní hřídeli a má počet zubů o dva menší než kolo tuhé, díky tomuto rozdílu může docházet k relativnímu pohybu mezi těmito koly [8].

Při deformaci pružného kola s vnějším ozubením, zapadají jeho zuby do zubových mezer tuhého ozubeného kola v místě hlavní eliptické osy. Při otáčení generátoru vln dochází k posunu záběrové zóny s hlavní eliptickou osou. Po otočení generátoru vln o 180° se pružné kolo relativně otočí o jeden zub vůči kolu tuhému, při úplném otočení pak dochází k posunu o rozdíl zubů těchto kol. Kvůli předpětí a radiálnímu pohybu zubů nedochází k vymezení žádné vůle [1].



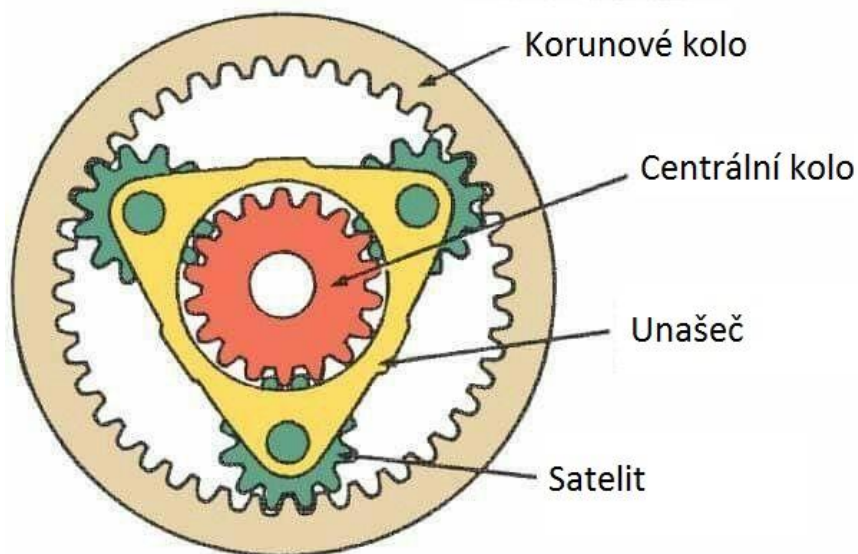
1. Eliptický generátor vln
2. Pružné ozubené kolo
3. Tuhé ozubené kolo

Obr. 7) převodovka HARMONIC-DRIVE [8]

Výhodou harmonické převodovky je přenos velkých kroutících momentů, u kterých by klasické převodovky měly značně vyšší rozměrové nároky. Další kritérium může být účinnost, která je v tomto případě vysoké zejména při nízkých otáčkách. Jelikož systém HARMONIC-DRIVE obsahuje pouze tři části, konkuruje ostatním typům převodovek ve hmotnosti a rozměru [1].

4.5.3 Planetové převodovky [1]

Tato převodovka se skládá také ze tří druhů součástí, jsou jimi korunové kolo s vnitřním ozubením, centrální kolo a satelity, které by měly být zpravidla nejméně dva a jsou uloženy na unašeci. Osy korunového kola, centrálního kola a unašče jsou společné. Satelity jsou v záběru se zbylými druhy ozubených kol. Současně konají dva druhy pohybů, na čepích se otáčejí kolem vlastní osy a také se otáčejí kolem centrální osy planetové převodovky, toto můžeme označit jako planetový pohyb. Sériovým zapojením více jednoduchých planetových převodovek vzniká složená převodovka, jejíž převodový poměr je dán součinem jednotlivých převodů v sérii.



Obr. 8) Planetová převodovka [7]

Zvláštním druhem můžeme považovat diferenciál, u kterého jsou všechny členy volné. Je využito kuželového ozubení a jeho účelem je rozložení vstupního kroutícího momentu na dvě hřídele v různém poměru.

Největší výhodou planetových převodovek je přenos velkých výkonů a vysoké převodové poměry vzhledem k rozměrům. Také můžeme dosáhnout vyšší životnosti a jednoduššího řazení díky kolům ve stálém záběru. Nevýhodou je dražší výroba, která souvisí se značnou komplikovaností.

4.5.4 Převodovky CYCLO-DRIVE [11], [1]

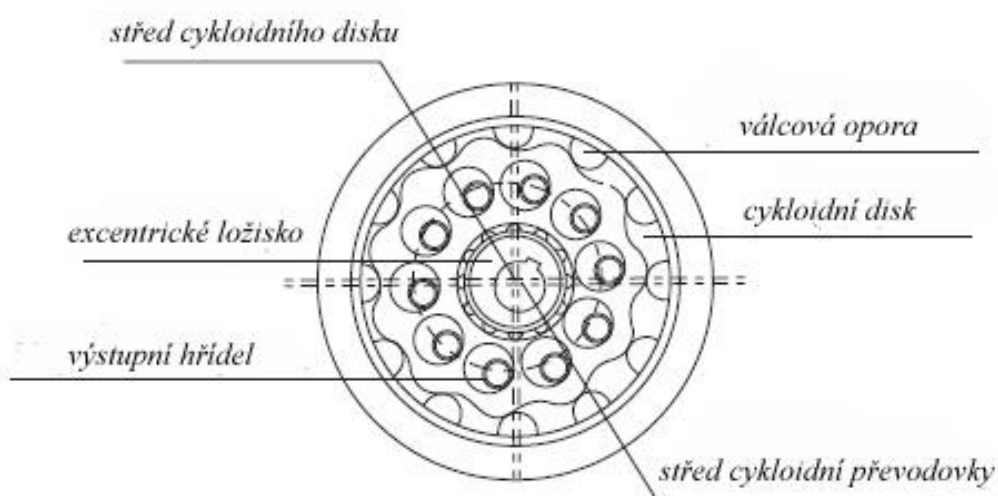
Tento unikátní druh převodovky spatřil světlo světa v roce 1930, ale kvůli svým vysokým požadavkům na přesnost jej nebylo možné vyrábět v sériové výrobě. Nyní už je, díky jeho přednostem, nezbytnou součástí převodů PR a je stále více využíván i přes podstatně vyšší cenu.

Princip je stejný jako předchozího typu převodky, ale v tomto případě jsou satelity nahrazeny dvěma cykloidními disky, které mají ozubení cykloidního tvaru. Ty jsou ve styku s korunovým kolem, které je pevné a jeho ozubení má kruhový tvar. Cykloidní disky mají o jeden

zub míň než kolo korunové. Bylo dosaženo hladkého valivého kontaktu bez poškození zubů. Unašeč je nahrazen vačkou, jejíž excentricita je shodná s ramenem původního unašeče.

Jelikož se zde využívá dvou cykloidních disků, je zapotřebí i dvou vaček, ty se pohybují po kružnici, jejíž poloměr je stejný jako velikost excentricity vaček. Cykloidní disky jsou rotačně uloženy na vačkách a díky otáčení vaček se dokáží pohybovat po vnitřním válečkovém ozubení. Výstupní výrobou můžeme převést pohyb těchto disků, a to pomocí nosných čepů, které jsou zasazené v otvorech disků. Disky musí být pootočené přesně o 180° , to proto aby díry vytvořily prostor pro nosný čep.

Nejdůležitější vlastností těchto převodovek je snížení tření a menší opotřebení. Díky tvaru ozubení a geometrii pohybu je ale složité navrhnout tento typ převodu, na rozdíl od konvenčního typu převodovek je zde zapotřebí počítat s průměrem základní kružnice, ale také na průměru tvořící kružnice.



Obr. 9) Schéma stavby cykloidní převodovky [13]

4.6 Pohybové jednotky

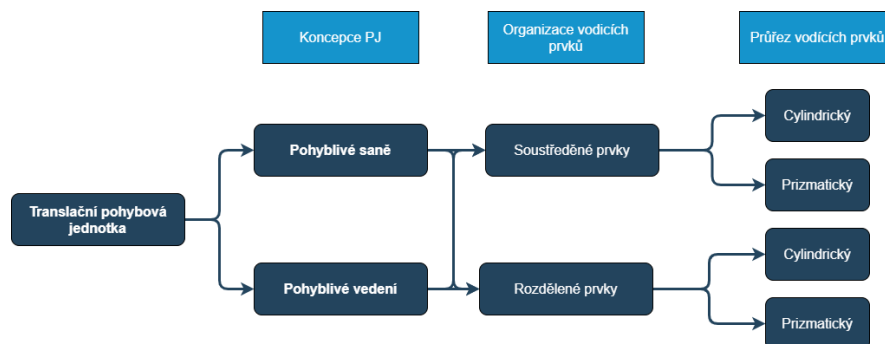
Dle konstrukčního hlediska můžeme rozdělit pohybové jednotky na:

- Pohybové
- Rotační
 - Jednotky, které mají možnost otočení točny o více než jednu otáčku
 - Jednotky kývavé, které nemají možnost otočení o více než 360° [1]

4.6.1 Pohybové jednotky s přímočarým pohybem

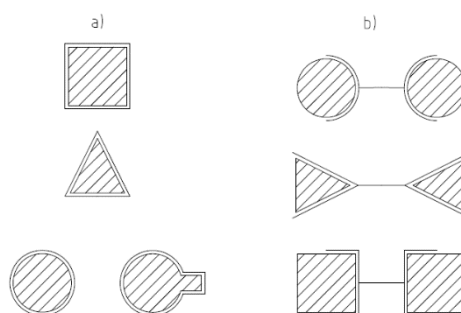
Lineární pohybové jednotky můžeme rozdělit na dva základní druhy, a to podle typu poháněné části jednotky. Pohybovat se mohou buď sáně (support) nebo vedení (vodící plochy). Názvem saně je označena kratší část jednotky vykonávající relativní pohyb, názvem vedení pak delší část jednotky. První varianta pohybu saní se využívá zejména ve spodních a základních částech robota pro jeho přesun. Druhá varianta pohybu vedení se využívá běžně a realizuje se vysouváním smykadla [1].

Uspořádání vodících ploch můžeme taktéž rozdělit do dvou skupin. Plochy, na kterých se tělesa stýkají, mohou být soustředěny na jedno těleso, to označujeme jako soustředné vedení, nebo mohou být rozdělena na několik od sebe vzdálených těles, takové pak označujeme jako rozdělené vedení [2].



Obr. 10) Koncepte upořádání přímočarých vedení [4]

Průřez vodících ploch může mít tvar čtverce, trojúhelníku nebo kruhu. Čtvercové a trojúhelníkové průřezy brání vedení v otočení vůči saním. V případě kruhového průřezu, musíme zajistit zabránění otočení umístěním per nebo přidáním vodící tyče. U rozděleného vedení tato situace nemůže nastat a nemusíme se zabezpečovat jednotku vůči otočení [2].

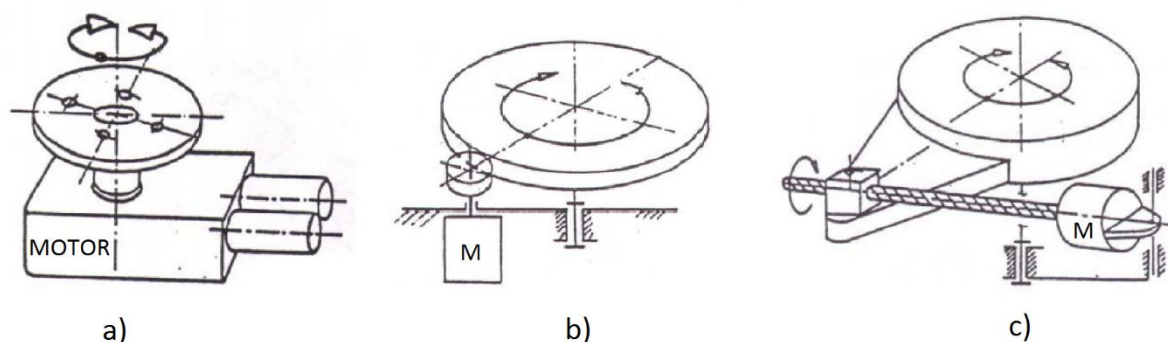


Obr. 11) Druhy vodících ploch a) soustředné prvky b) rozdělené prvky [1]

4.6.2 Pohybové jednotky s rotačním pohybem [4]

Rotační jednotky, které mají teoretickou možnost otočení točny o více než jednu otáčku, můžeme rozdělit do dvou základních skupin. A to na rotační jednotky s přímým nebo nepřímým náhonem. Jednotky s přímým pohonem jsou menších rozměrů a jejich točna je přímo součástí motoru. Jednotky s nepřímým pohonem bývají větších rozměrů, kde točna bývá samostatně uložena a je spojena s motorem pomocí převodu, např. ozubenými koly nebo řemenem.

U kyvných jednotek nedovoluje konstrukční řešení otočení točny o více než 360° . Tyto jednotky můžeme rovněž rozdělit do skupin s přímým a nepřímým náhonem. Pokud je na výstupu motoru přímo využita natáčivá část jednotky, hovoříme pak o řešení s přímým náhonem. Častěji je však využito kývavých jednotek s nepřímým náhonem, kdy v transformaci pohonu dochází k nelineární závislosti. Tato koncepce využívá ozubených hřebenů, pohybových šroubů nebo pneumatických válců.



Obr. 12) Rotační jednotky – a) otočný stůl s přímým náhonem b) otočný stůl s převodem c) pohon s pohybovým šroubem [1]

4.7 Přehled dostupných řešení modulů na trhu

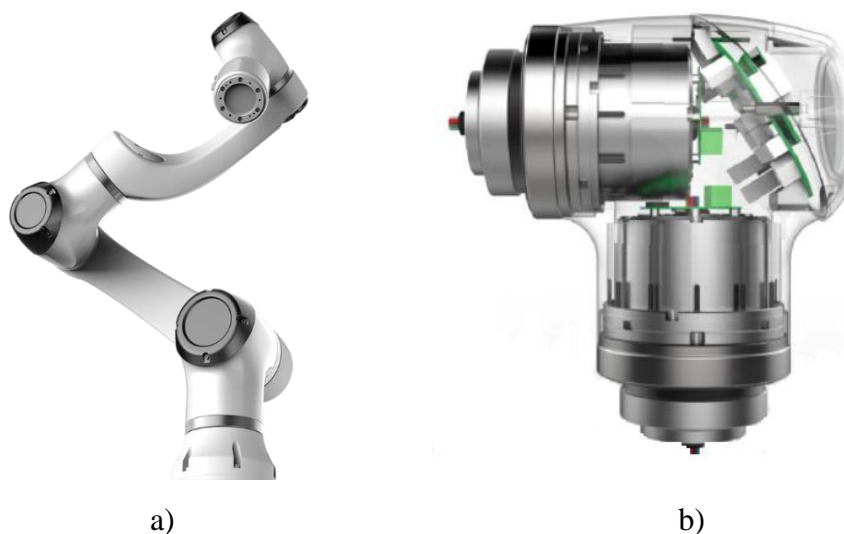
Se získanými znalostmi předchozí části práce se v této kapitole bude věnovat konstrukčním řešením modulů a modulárních robotických ramen.

4.7.1 Elfin E5

Robotické rameno Elfin od společnosti Han's Robot pracuje v šesti osách a sestává se pouze ze tří modulů, konstrukce se totiž zakládá na rotaci modulu ve dvou osách. Hlavní částí jsou bezrámové momentové motory, které jsou doplněny harmonickými převodovkami, brzdami, senzory a kontroléry. Těla ramene jsou vytvořena ze slitin hliníku. Propojení elektronických částí je realizováno vedením kabeláže vnitřní částí robota. Spojení modulů s propojovacími částmi robota je provedeno šroubovým spojem. V tabulce 1) jsou vypsány technické parametry celého ramene [24].

Tab 1) Technické parametry modulárního ramene Elfin E5

Výkon	180 W	Napětí	24 V
Nosnost ramene	5 kg	životnost	35 000 hod.
Jmenovitý kroutící moment	9,4-156 Nm	Dosah ramene	800 mm
Rychlost kloubu	135°/s	Teplota	0 až 50°C
Hmotnost ramene	23 kg	Cena	250 000,- Kč/3 ks modulů



Obr. 13) a) Modulární robot Elfin E5 b) detail modulu [24]

4.7.2 RDrive

Firma Rozum Robotics vyvinula sérii modulů RDrive, které jsou dostupné v pěti velikostech, a to výkonech v rozmezí 65-450 wattů. Jejich cílem bylo uložit všechny prvky do modulu válcovitého tvaru, který je pomocí šroubů uchycen do konstrukce robotického ramene. V těle modulu najdeme konstrukční prvky jako bezkartáčový AC motor, harmonickou převodovku, dva absolutní enkodéry a kontroler. Kabelové spojení jednotlivých mechanických částí kloubu je vedeno dutým hřídelem předchozího kloubu do kontroleru téhož kloubu. Jako výhodu pro kutily shledávám možnost vytisknutí propojovacích částí metodou 3D tisku. Technické specifikace jednoho kloubu jsou uvedeny v tabulce 2) [23].

Tab 2) Technické parametry modulu RDrive 60

Výkon	225 W	Napětí	48 V
Jmenovitý krouticí moment	39 Nm	Životnost	35 000 hod.
Maximální krouticí moment	54 Nm	Převodový poměr	i=100
Otáčky	55 ot./min	Teplota	0 až 35°C
Hmotnost	890 g	Cena	70 000,- Kč/ks



Obr. 14) Moduly RDrive od Rozum Robotics [23]

4.7.3 LWR III

V roce 2003 představil německý institut pro robotiku DLR třetí generaci robotů LWR. Unikátnost tohoto robota je v jeho poměru nosnosti k samotné váze, který je 1:1. Hlavními konstrukčními uzly je harmonická převodovka, motory ILM a konstrukce z velmi lehkých a pevných materiálů. Toto robotické rameno má sedm stupňů volnosti, díky čemuž může být více flexibilní než klasická robotická ramena. Jednotlivé moduly jsou spojeny prvky z uhlíkových vláken a komunikují spolu přes optické kabely. Při maximálním zatížení je rychlost jednotlivých kloubů až 120°/s. Každý modul obsahuje senzory pro kontrolu polohy, momentu a impedance [26]



Obr. 15) Model robotického ramena LWR III [26]

5 ROZBOR PRÁCE

5.1 Problémová situace

Na trhu s průmyslovými roboty se nachází mnoho firem, které nabízí velmi rozdílné produkty s různými technickými parametry a oblastmi použití. Pro stále zvyšující se požadavky zákazníka může být stavebnicové provedení klíčové. Předností takové koncepce je možnost co nejpřesnějšího přizpůsobení dané aplikaci, což se projeví na stupni využití takového zařízení a v pořizovacích nákladech.

5.2 Formulace problému

Vytvoření stavebnicového provedení robota, které se bude skládat ze samostatných funkčních celků – modulů. Ty můžeme rozdělit do dvou kategorií, hlavní moduly, tj. pohybové jednotky a propojovací moduly, tj. mezikusy, stojany apod.

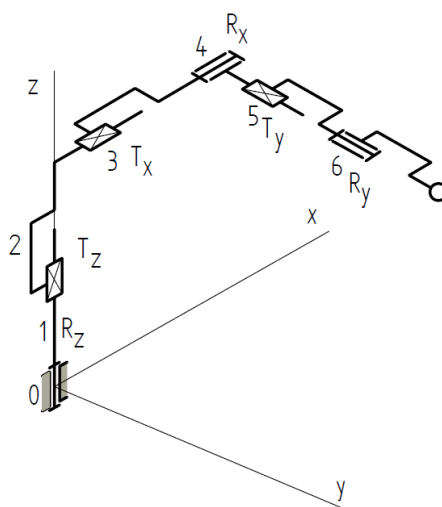
5.3 Formulace cílů a řešení

Cíle bakalářské práce jsou následující:

- Tvorba návrhových variant
- Multikriteriální analýza
- Konstrukční návrh
- Návrhové výpočty
- Výkresová dokumentace
- Ekonomické zhodnocení
- Závěr a doporučení

5.4 Popis řešené soustavy

Řešenou soustavou je modul robota, který se skládá z jednotlivých konstrukčních prvků. Tento modul může představovat rotační nebo posuvnou kinematickou dvojici. Složením více modulů vytvoříme kinematický řetězec průmyslového robota, tj. robotické rameno.



Obr. 16) Kinematický řetězec PR se 6 stupni volnosti [4]

5.5 Systém podstatných veličin

- Veličiny popisující okolí modulu

Modul se bude nacházet ve výrobní hale, kde na něj bude působit tíhové zrychlení, minimální teplota -10 °C a maximální teplota 50 °C .

- Geometrie a topologie modulu

Modul je trojrozměrný objekt, jehož maximální rozměry nebyly zadáním této bakalářské práce stanovené.

- Veličiny popisující projevy modulu

Základními veličinami robota je jeho hmotnost a rozměry.

- Důsledky projevu

Výsledkem konstrukce a spojením jednotlivých modulů je vytvoření robotického ramena, které je schopno vytvářet různé pohyby.

6 NÁVRHOVÉ VARIANTY

Na základě shromážděných informací v první části práce, jsou vyhotoveny dvě návrhové varianty. Obě varianty odpovídají sériovému typu robota, tedy takovému, který má otevřený kinematický řetězec.

6.1 Varianta 1

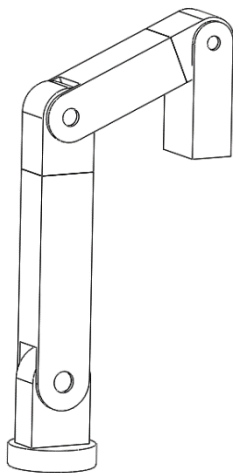
První variantou je 4-osé robotické rameno, kde každý modul představuje rotační pohybovou jednotku. Toto rameno by eliminovalo přítomnost jakékoliv převodovky a pracovalo by ve sférickém pracovním prostoru na principu převodu rotačního pohybu krokového motoru šnekovým soukolím do osy kolmé k ose pohonu. Základnou je otočný stůl pro vytvoření čtvrté rotace.

Pohyb začíná roztočením krokového motoru, který jednoduchým převodem roztočí šnek. Osy obou prvků jsou rovnoběžné. Šroubovitý pohyb šneka uvádí do pohybu ozubené kolo, jehož osa je kolmá k ostatním. Použitím šroubů jsou připojeny dvě výstupní příruby na obě strany ozubeného kola. Následující modul je připojen konstrukcí ve tvaru „U“ na předchozí. Vedení kabeláže musí být realizováno mimo tělo robota.

6.1.1 Výhody a nevýhody varianty 1

Největší výhodou je malý počet konstrukčních částí a s tím souvisí nízká cena. S robotem tohoto typu by mohli automatizovat výrobu i menší podnikatelé. Díky novým metodám a materiálům ve 3D tisku, byla by možnost vyrábět některé díly pomocí „rapid prototyping“, což by mělo další pozitivní vliv na pokles ceny.

Nevýhodou je absence převodovky a brzdy. Pokud se v modulu nebude vyskytovat převodovka, musí už výstup z pohonu zajistit dostatečnou velikost kroutícího momentu. Koncový uživatel se musí vyvarovat aplikaci, kdy dochází k dlouhému držení břemene ve vzduchu, protože absencí brzdy by mohlo dojít k přetížení pohonu, a tak ke zničení modulu nebo dokonce celého robota.



Obr. 17) Návrhový model varianty 1

6.2 Varianta 2

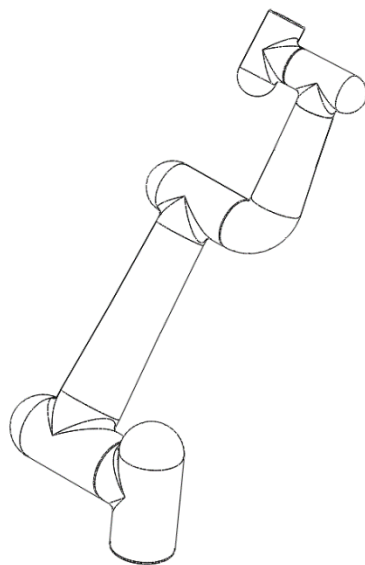
Varianta číslo dvě využívá také rotačních vazeb, ale osa otáčení výstupní příruby je v tomto případě shodná s osou otáčení pohonu. Spojením až pěti takovýchto modulů vznikne robot, jehož koncový efektor tvoří torusový objem a pohybuje se v angulárním pracovním prostoru. V této návrhové variantě je hlavním konstrukčním prvkem bezrámový servomotor, který má malé zástavbové rozměry, avšak dostačující výkon. Další podstatnou částí je harmonická převodovka, která funguje jako reduktor. Snížením otáček zvýšíme výstupní krouticí moment, který je stěžejní pro výslednou nosnost celého robotického ramene. V neposlední řadě bude aplikována elektromagnetická brzda, která bude uložena na konci hřídele, sloužící k aretaci polohy. Modul končí přírubou, na kterou se montuje další modul nebo propojovací části pomocí šroubového spoje.

Pohyb začíná tím, že je puštěn signál do příslušného motoru, ten začíná roztáčet rotor motoru na požadované otáčky, na stejném hřídeli jako je rotor je i brzda a generátor vln pro harmonickou převodovku. Druhý hřídel je připojen na výstup z harmonické převodovky a na výstupní přírubu. Řídicí jednotka celý čas přijímá zpětnou vazbu od senzorů polohy a momentu. V případě, že dosaženo požadovaných souřadnic, je spuštěna brzda a pohon vypnut. Brzda je aktivní do momentu, kdy pohon dostane nový signál pro pohyb ramene do nových souřadnic.

6.2.1 Výhody a nevýhody varianty 2

Druhá varianta je složitější než první, ale její předností je schopnost vykonávat komplexnějších pohybů a tím má větší variabilitu pracovních cyklů a aplikací. Využitím harmonické převodovky vzniká další výhoda, a to vysoká přesnost a opakovatelnost.

Nevýhodou této varianty je dutá hřídel pro vedení kabeláže, tomuto místu musí být věnována největší pozornost, protože při nedostatečných pevnostních charakteristikách může dojít ke zkroucení nebo dokonce prasknutí hřídele, a tím i poškození dalších částí modulu nebo okolního prostředí robota. Další nevýhodou je potřeba propojovacích modulů, které budou muset být adaptivní jak na velikost modulu, tak i na potřebnou délku ramene, což bude ovlivňovat celkovou cenu.



OBR. 18) Návrhový model varianty 2

7 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA VARIANT

Pro vytvoření optimální návrhové varianty je využito multikriteriální analýzy. V této metodě je důležitý výběr náležitých parametrů P_i , které charakterizují každou návrhovou variantu. Těmto parametrům je následně přiřazena váha VP_i , která odpovídá důležitosti parametru. Nakonec jsou obodovány jednotlivé parametry dané varianty BP_i . Výsledný počet bodů bude vypočítán podle následujícího vztahu [21]:

$$\varepsilon_i = \frac{\sum VP_i * BP_i}{\sum VP_i} * 100 [\%] \quad (1)$$

7.1 Parametry hodnocení

- P1: Objem pracovního prostoru:** je objem obálky, která je vytvořena pohybem efektoru robota
- P2: Typ pohonu:** zhodnocení pohonu jako celku, např. výkon, kroutící moment, velikost, hmotnost, tuhost aj.
- P3: Typ převodu:** zhodnocení převodu jako celku, např. rozměr, převodový poměr, hmotnost aj.
- P4: Složitost konstrukce:** odpovídá počtu a složitosti řešení jednotlivých uzlů a částí
- P5: Modularita:** je separabilita systému do jednotek, které jsou na sobě nezávislé
- P6: Velikost modulu:** celkové rozměry návrhové varianty budou odhadnuty z přibližných rozměrů použitých částí
- P7: Rozšiřitelnost:** je možnost vytvoření dalších řad modulu, při zachování stávající koncepce
- P8: Flexibilita:** je přizpůsobení robota podle nároku zákazníka a možnost změny uspořádání jednotlivých modulů

7.2 Přiřazené váhy parametrům

V následující tabulce 1) jsou zapsány celkové váhy parametrů a jejich odůvodnění.

Tab 3) Váhy jednotlivých parametrů a jejich odůvodnění

Parametr	Váha parametru	Odůvodnění váhy parametru
P1	$VP_1 = 0,4$	Parametr může ovlivňovat využití robotického ramene
P2	$VP_2 = 0,8$	Parametr je důležitý pro technické parametry modulu
P3	$VP_3 = 0,8$	Parametr značně ovlivňuje kroutící moment a výstupní rychlosti
P4	$VP_4 = 0,6$	Parametr značně ovlivňuje přesnost, ale i cenu celého systému
P5	$VP_5 = 1$	Parametr charakterizuje ideu modulární koncepce
P6	$VP_6 = 0,8$	Parametr značně ovlivňuje využití, moment setrvačnosti a polohu těžiště
P7	$VP_7 = 0,6$	Parametr charakterizuje ideu modulární koncepce
P8	$VP_8 = 0,2$	Parametr při prvotním návrhu není prioritní, ale v dalším vývoji je nezbytný

7.3 Hodnocení varianty 1

V následující tabulce 3) jsou zapsány body daných parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

Tab 4) Hodnocení parametrů varianty 1

Parametr	Body Parametru	Odůvodnění hodnoty parametru
P1	$BP_{11} = 0,3$	Objem je druhý největší možný
P2	$BP_{12} = 0,6$	Pohon umožňuje rychlý rozběh a zastavení
P3	$BP_{13} = 0,6$	Převod je jednoduchý, avšak nezvyšuje krouticí moment
P4	$BP_{14} = 0,6$	Méně konstrukčních prvků a jednodušší
P5	$BP_{14} = 0,4$	V menším počtu jsou moduly hůř využitelné
P6	$BP_{15} = 0,4$	Krokový motor s vhodným momentem může mít velké zástavbové rozměry
P7	$BP_{16} = 0,4$	Koncept je vhodný pro budoucí rozšíření
P8	$BP_{18} = 0,2$	Splňuje nároky pro aktuální poptávku firem

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 7.

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{VP_1 \cdot BP_{11} + VP_2 \cdot BP_{12} + VP_3 \cdot BP_{13} + VP_4 \cdot BP_{14}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4 + VP_5 + VP_6 + VP_7 + VP_8} + \frac{VP_5 \cdot BP_{15} + VP_6 \cdot BP_{16} + VP_7 \cdot BP_{17} + VP_8 \cdot BP_{18}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4 + VP_5 + VP_6 + VP_7 + VP_8} \right) * 100 \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0,4 \cdot 0,3 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,4 + 0,6 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,2}{0,4 + 0,8 + 0,8 + 0,6 + 1 + 0,8 + 0,6 + 0,2} * 100$$

$$\varepsilon_1 = \underline{\underline{41,7 \%}}$$

7.4 Hodnocení varianty 2

V následující tabulce 3) jsou zapsány body daných parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

Tab 5) Hodnocení parametrů varianty 2

Parametr	Body parametru	Odůvodnění hodnoty parametru
P1	$BP_{21} = 0,4$	Objem vytvořený touto koncepcí je největší možný
P2	$BP_{22} = 0,6$	Vhodný poměr výkonu k hmotnosti
P3	$BP_{23} = 0,6$	Kompaktní rozměry a vhodné převodové poměry
P4	$BP_{24} = 0,4$	Větší množství konstrukčních prvků, které jsou úzce propojeny
P5	$BP_{25} = 0,8$	I při menším počtu propojených modulů může mít robot využití v praxi
P6	$BP_{26} = 0,6$	Kompaktní a efektivně zaplněný zástavbový prostor
P7	$BP_{26} = 0,4$	Koncept plně podporuje rozšíření do větších řad
P8	$BP_{28} = 0,2$	Splňuje nároky pro aktuální poptávku firem

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 7.

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{VP_1 \cdot BP_{21} + VP_2 \cdot BP_{22} + VP_3 \cdot BP_{23} + VP_4 \cdot BP_{24}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4 + VP_5 + VP_6 + VP_7 + VP_8} + \frac{VP_5 \cdot BP_{25} + VP_6 \cdot BP_{26} + VP_7 \cdot BP_{27} + VP_8 \cdot BP_{28}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4 + VP_5 + VP_6 + VP_7 + VP_8} \right) * 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,4 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,8 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,2}{0,4 + 0,8 + 0,8 + 0,6 + 1 + 0,8 + 0,6 + 0,2} * 100$$

$\varepsilon_2 = 56,2 \%$

7.5 Výběr varianty

Na základě multikriteriální analýzy, která celkem obsahovala osm hodnotících parametrů, byla vybrána varianta číslo dva, která dosáhla nejvyššího bodového hodnocení. Ta byla lepší ve většině ohledech až na složitost konstrukce.

Tab 6) Celkové hodnocení variant

Varianta	1	2
<i>Celkové hodnocení</i>	41,7 %	56,2 %

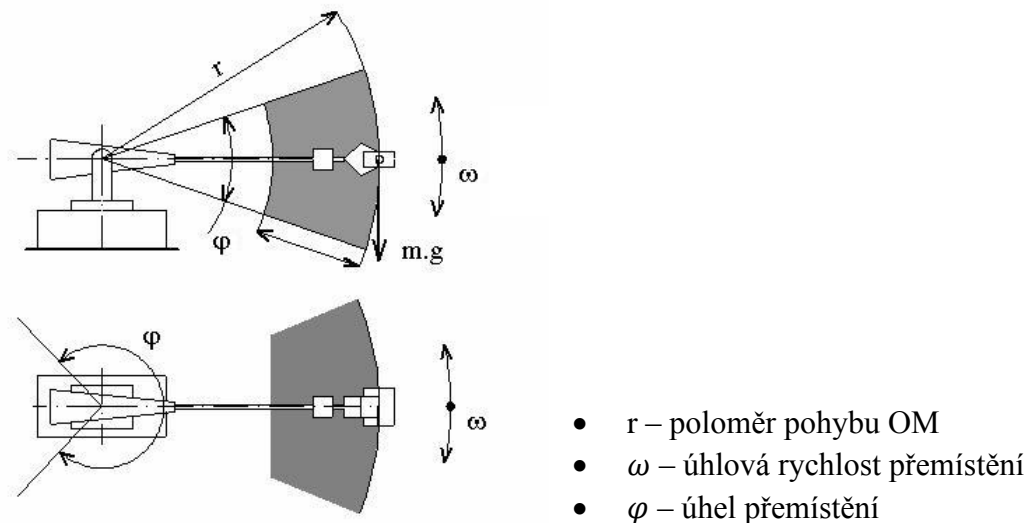
8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

8.1 Stanovení vstupních parametrů

Na základě průzkumu trhu byly zvoleny základní parametry robotického ramena a jednotlivých modulů pro konkurenci schopnost. Na obr. 17) jsou tyto parametry znázorněny.

Tab 7) Vstupní parametry

Hmotnost objektu manipulace	$m_{OM} = 5 [kg]$
Poloměr pohybu OM modulu č. 1	$r_1 = 1,6 [m]$
Poloměr pohybu OM modulu č. 2	$r_2 = 0,8 [m]$
Poloměr pohybu OM modulu č. 3	$r_3 = 0,3 [m]$
Max. úhel přemístění OM	$\varphi = \frac{3}{2}\pi [rad]$
Max. rychlost přemístění OM modulu č. 1	$\omega_1 = 150 [^\circ \cdot s^{-1}]$ $= 0,83\pi [rad \cdot s^{-1}]$
Max. rychlost přemístění OM modulu č. 2	$\omega_2 = 165 [^\circ \cdot s^{-1}]$ $= 0,92\pi [rad \cdot s^{-1}]$
Max. rychlost přemístění OM modulu č. 3	$\omega_3 = 180 [^\circ \cdot s^{-1}]$ $= \pi [rad \cdot s^{-1}]$



Obr. 19) Schéma vstupních parametrů [4]

8.2 Výběr pohonu

U aplikací, kde jsou důležité parametry polohy, se nejvíce využívají servomotory, které pracují s přibližnou účinností 95 % v případě otáček větších než 1 000 ot/min. Při práci se s takovým motorem můžeme dobře řídit polohu natočení výstupní hřídele, moment a rychlost. Graf závislosti výkonu a otáček je u servomotorů lineární, díky tomu můžeme zajistit rovnoměrné rozložení výkonů v jednotlivých modulech robota. Pro modulární koncepci je nejvhodnější

zvolit bezrámový servomotor, který se skládá pouze ze statoru a rotoru, které jsou vloženy do sestavy stroje. Rotor je pak spojen přímo se s hnanou sestavou a není zde pak žádný mechanický prvek jako například spojka, převody nebo řemenice. Předností těchto motorů je podstatně nižší odezva sestavy a nižší zástavbové rozměry.

Minimální výkon motoru modulu se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$P_{min} = \frac{M_n + M_d}{\eta} * \omega [W] \quad (4)$$

M_n – moment nevyvážených hmot

M_d – dynamický moment při rozběhu

Koeficient účinnosti převodů

$$\eta = 0,8 [-]$$

Dynamický moment při rozběhu:

$$M_{di} = k_2 * m_{OM} * r_i^2 * \frac{\omega_i^2}{2 * k_1 * \varphi} [N.m] \quad (5)$$

Koeficient návrhu

$$k_1 = 0,1 [-]$$

Koeficient provedení konstrukce

$$k_2 = 2,05 [-]$$

Výpočet M_d pro modul č. 1:

$$M_{d1} = k_2 * m_{OM} * r_1^2 * \frac{\omega_1^2}{2 * k_1 * \varphi} = 2,05 * 7 * 1,6^2 * \frac{(0,84\pi)^2}{2 * 0,1 * \frac{3}{2}\pi} = 193,89 [N.m] \quad (6)$$

Moment nevyvážených hmot:

$$M_{ni} = m_{OM} * g * r_i [N.m] \quad (7)$$

Tíhové zrychlení

$$g = 9,81 [m.s^{-2}]$$

Výpočet M_n pro modul č. 1:

$$M_{n1} = m_{OM} * g * r_1 = 5 * 9,81 * 1,6 = 78,48 [N.m] \quad (8)$$

Dosazení M_d a M_n do vzorce pro minimální výkon modulu č. 1:

$$P_{1min} = \frac{M_{n1} + M_{d1}}{\eta} * \omega_1 = \frac{78,48 + 193,89}{0,8} * 0,84\pi = 898,46 [W] \quad (9)$$

V tabulce 5) jsou vypočítané hodnoty pro zbylé moduly č. 2 a 3, a to za použití stejných vzorců jako v případě modulu č. 1.

Tab 8) Srovnání klíčových výsledků všech modulů

	M_{ni}	M_{di}	P_{imin}
Modul č. 1	$M_{n1} = 78,5 [N.m]$	$M_{d1} = 193,9 [N.m]$	$P_{1min} = 898,5 [W]$
Modul č. 2	$M_{n2} = 24,5 [N.m]$	$M_{d2} = 22,7 [N.m]$	$P_{2min} = 170,7 [W]$
Modul č. 3	$M_{n3} = 14,7 [N.m]$	$M_{d3} = 9,7 [N.m]$	$P_{3min} = 95,7 [W]$

Podle výsledků minimálních výkonů byly vybrány nejbližší použitelné pohony od firmy Kollmorgen sériové řady TBM, jejich jednotlivé hodnoty a označení jsou zaznačeny v tabulce 9).

Tab 9) Parametry zvolených pohonů [22]

	Zvolený výkon pohonu	Označení pohonu	Jmenovitý kroučící moment pohonu	Jmenovité otáčky pohonu
Modul č. 1	$P_1 = 900 [W]$	TBM-12941-A	$M_{R1} = 8,27 [N.m]$	$n_{j1} = 1600 [ot/min]$
Modul č. 2	$P_2 = 210 [W]$	TBM-7631-B	$M_{R2} = 1,69 [N.m]$	$n_{j2} = 1300 [ot/min]$
Modul č. 3	$P_3 = 139 [W]$	TBM-6025-B	$M_{R3} = 0,71 [N.m]$	$n_{j3} = 2450 [ot/min]$



Obr. 20) Bezrámový servopohon TBM [16]

8.3 Výběr převodovky

V návrhové variantě byla zvolena harmonická převodovka, jejím úkolem bude redukce otáček a zvýšení kroučících momentů od motoru k ramenu robotu. U převodovek robotických ramen je důležitá vůle, protože nedochází pouze ke zvýšení kroučícího momentu, ale i transformaci momentu setrvačnosti. Díky malému rozdílu počtu zubů harmonických převodovek, je tato vůle v řádech jednotek sekund stupně a změna momentu setrvačnosti může být brána jako zanedbatelná.

Převod max. rychlosti přemístění OM na výstupní otáčky příruby modulu

$$n_{iout} = \frac{\omega_i}{2\pi} * 60 [ot/min] \quad (10)$$

- Výstupní otáčky příruby modulu č. 1 $n_{1out} = 24,9 [ot/min]$
- Výstupní otáčky příruby modulu č. 2 $n_{2out} = 27,6 [ot/min]$
- Výstupní otáčky příruby modulu č. 3 $n_{3out} = 30 [ot/min]$

Stanovení převodového poměru (Willisova metoda) [4]:

$$i = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{n_j}{n_{out}} [-] \quad (11)$$

ω_{in} - Vstupní úhlová rychlost rotoru motoru

ω_{out} - Výstupní úhlová rychlost

Výpočet převodového poměru pro modul č. 1:

$$i_1 = \frac{n_{j1}}{n_{1out}} = \frac{1600}{24,9} = 64,3 [-] \quad (12)$$

Výsledný moment

$$M_{vi} = i_i * M_{Ri} [Nm] \quad (13)$$

Výpočet výsledného momentu pro modul č. 1:

$$M_{v1} = i_1 * M_{R1} = 80 * 8,27 = 661,6 [Nm] \quad (14)$$

Tab 10) Harmonické převodovky [25]

	Převodový poměr modulů	Zvolený převodový poměr	Označení převodovky	Výsledný moment
Modul č. 1	64,3	80	LHS-III-40-80	$M_{v1} = 661,6 Nm$
Modul č. 2	47,1	50	LHS-III-20-50	$M_{v2} = 84,5 Nm$
Modul č. 3	81,7	100	LHS-III-17-100	$M_{v3} = 70,6 Nm$

8.4 Výběr brzdy

Při výběru brzdy musíme myslet na důvod použití, tím je dlouhé držení nastavených poloh a případné nouzové brzdění pro zajištění bezpečnosti práce, např. při výpadku napájení. Proto jako elektromagnetickou brzdu volím typ ovládaný působením síly pružiny. Mezi výhody můžeme zahrnout tichý chod, dlouhou životnost a stabilní brzdny výkon.

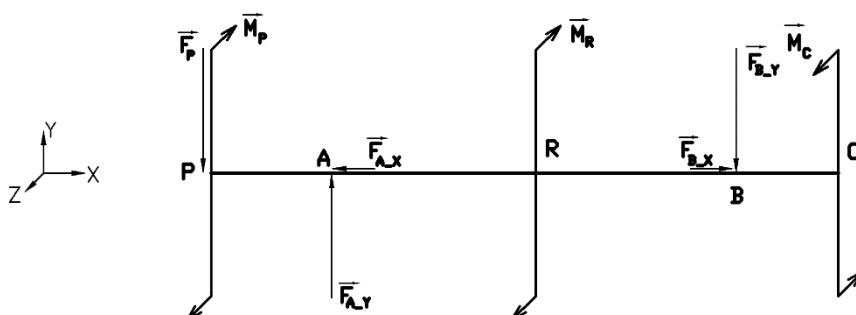
Tab 11) Zvolené brzdy [19]

	Označení brzdy	Moment statického tření
Modul č. 1	BXR-10-10-016	$M_{C1} = 16 Nm$
Modul č. 2	BXR-050-10LE	$M_{C2} = 3,20 Nm$
Modul č. 3	BXR-040-10LE	$M_{C3} = 1,32 Nm$

8.5 Úplné uvolnění hřídele

Pro výpočty sil, momentů a výsledných vnitřních účinků je hřídel uvažován jako prizmatický hladký prut. Vstupním parametrem je krouticí moment motoru, žádná další veličina zde nepůsobí, jelikož se při chodu rotor nachází v magnetickém poli vytvořeném statorem. V místech A a B jsou ložiska, ta jsou upevněna k základu a chovají se jako rotační vazby, které jsou uvolněny jako radiální a axiální síla. V místě P, které je vstupním bodem do harmonické převodovky, je krouticí moment a reakční radiální síla. Při aktivaci brzdy je v místě C krouticí moment, který působí proti zbylým momentům na hřídeli.

Z obrázku 21) zatíženého hřídele je vidět, že jediné axiální síly jsou v ložiscích a žádné další axiální síly v zatížení nejsou, můžeme je tedy považovat jako nulové.



Obr. 21) Schéma uvolněného hřídele

8.5.1 Vyjádření kroutících momentů na hřídeli

Při ustáleném chodu modulu jsou aktivní krouticí momenty pouze v místě rotoru a převodovky, velikosti jsou si v takovém případě rovny a hřídel je mezi těmito body namáhán rovnoměrně. Změna nastává při aktivaci brzdy, kdy je vytvořen krouticí moment ve směru opačném momentům rotujícího hřídele a velikostí roven součtu takovýchto momentů.

Rovnice rovnováhy kroutících momentů:

$$\sum M_K = 0: \quad 0 = M_P + M_R - M_C \quad (15)$$

Krouticí momenty v místě převodovky a v čase aktivace brzdy tedy můžeme vypočítat vyjádřením parametru M_P z předchozí rovnice (13):

$$M_{P1} = M_{C1} - M_{R1} = 16 - 8,27 = 7,73 \text{ [Nm]} \quad (16)$$

$$M_{P2} = M_{C2} - M_{R2} = 3,2 - 1,69 = 1,51 \text{ [Nm]} \quad (17)$$

$$M_{P3} = M_{C3} - M_{R3} = 1,32 - 0,71 = 0,61 \text{ [Nm]} \quad (18)$$

8.5.2 Kritické zatížení hřídele radiální silou

Důležitým bodem každé konstrukce, je přípustné zatížení využitých součástí. V tomto návrhu shledávám rizikovým místem hřídel, který spojuje motor, převodovku i brzdu. Následující výpočty ověří, že při maximálním zatížení a teoretickém dosáhnutí mezní hodnoty síly v ložiscích, nepřesáhne radiální síla na vstupní přírubě převodovky kritickou velikost.

Mezní síla pro ložisko [17]:

$$F_i = \frac{C * \sqrt[3]{10^6}}{\sqrt[3]{L}} [N] \quad (19)$$

C – Základní dynamická únosnost [kN]

L – Základní trvanlivost [hod]

Konstanta kuličkových ložisek

$$a = 3 [-]$$

Vypočítané mezní síly pro ložisko v místě A modulu č. 1:

$$C_A = 58,5 \text{ kN}$$

$$L = 15\,000 \text{ hod}$$

$$F_{1_A} = \frac{C_A * \sqrt[3]{10^6}}{\sqrt[3]{L}} = \frac{58,5 * \sqrt[3]{10^6}}{\sqrt[3]{15\,000}} = 237,2 [N] \quad (20)$$

Z následující momentové rovnice vztažené k bodu P vyjádříme velikost síly v ložisku B.

$$L_1 = 29,5 \text{ mm}$$

$$L_2 = 99 \text{ mm}$$

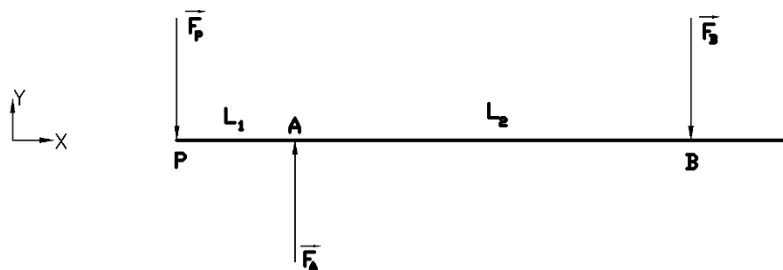
$$\sum M_{Pi} = 0: \quad 0 = F_{i_A} * L_1 - F_{i_B} * (L_1 + L_2) \quad (21)$$

$$F_{1_B} = \frac{F_{1_A} * L_1}{L_1 + L_2} = \frac{237,2 * 29,5}{29,5 + 99} = 54,5 [N] \quad (22)$$

Z následující momentové rovnice, vztažené k bodu B, můžeme dopočítat radiální sílu působící na harmonickou převodovku. Tento výsledek pak porovnáme s maximální přípustnou silou danou výrobcem, pokud bude menší pak je zatížení přípustné.

$$\sum M_{Bi} = 0: \quad 0 = F_{1_P} * (L_1 + L_2) - F_A * L_2 \quad (23)$$

$$F_{1_P} = \frac{F_A * L_2}{L_1 + L_2} = \frac{237,21 * 99}{29,5 + 99} = 182,7 [N] \quad (24)$$



Obr. 22) Radiální zatížení hřídele

Tab 12) Splnění maximální přípustné síly v místě převodovky

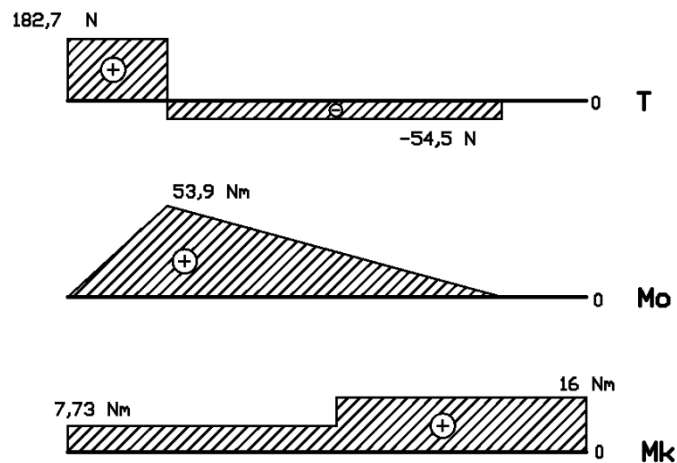
	Mezní síla v ložisku A	Síla v ložisku B	Síla na převodovce	Max. dovolená síla v místě P	Splňuje
Modul č.1	F_{1_A} = 237,2 N	F_{1_B} = 54,5 N	F_{1_P} = 182,7 N	F_{1_Pmax} = 1 000 N	Ano
Modul č.2	F_{2_A} = 131,8 N	F_{2_B} = 30,4 N	F_{2_P} = 101,2 N	F_{2_Pmax} = 300 N	Ano
Modul č.3	F_{3_A} = 82,3N	F_{3_B} = 20,8 N	F_{3_P} = 61,5 N	F_{3_Pmax} = 200 N	Ano

Kontrolou statické rovnováhy potvrdíme správnost výsledku, a to tak že součtem všech sil a zohledněním jejich směrů vyjde 0.

$$\sum F_i = 0: \quad -F_{1_A} + F_{1_B} + F_{1_P} = -237,2 + 54,5 + 182,7 = 0 \text{ [N]} \quad (25)$$

Z průběhu výsledných účinků můžeme říct, že maximální ohybový moment nastane v místě ložiska A, a to z důvodu protnutí nulové hodnoty posouvající síly T.

$$M_{o_max} = F_{1_P} * L_1 = 53,9 \text{ [Nm]} \quad (26)$$



Obr. 23) Výsledné vnitřní účinky modulu č. 1

8.6 Kontrola per na otláčení

V modulech jsou využita dvě různá pera, pero 8x7 v největším modulu a pero 6x6 ve zbylých dvou velikostech. Následující výpočty potvrdí, že navržená délka pera je větší než minimální a že nedojde k otláčení mezi bokem drážky v náboji a perem. K výpočtům je použito největších kroutících momentů na pero.

Stanovení minimální délky pera [18]:

$$l' = \frac{M_k}{\left(\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}\right) \cdot t_1 \cdot P_D} \text{ [mm]} \quad (27)$$

$$l_{min} = l' + b \text{ [mm]} \quad (28)$$

Výsledný tlak mezi bokem drážky a perem nesmí přesáhnout dovolený tlak P_D , který je u oceli 120 MPa.

$$P_p = \frac{M_k}{\left(\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}\right) \cdot t_1 \cdot l} \leq P_D \text{ [MPa]} \quad (29)$$

Tab 13) Přehled parametrů pro výpočet per

	Průměr d	Šířka b	Hloubka drážky t_1	M_k	l_{min}	$l_{zvolené}$	P_p	Splňuje
Pero 8x7	24 mm	8 mm	2,9 mm	16 000 Nmm	11,42 mm	16 mm	25,64 MPa	Ano
Pero 6x6	20 mm	6 mm	4,1 mm	3 200 Nmm	6,87 mm	12 mm	8,71 MPa	Ano

8.7 Volba senzorů

Při navrhování prvotního konceptu je nutné myslet v první řadě na interní senzory, které umožňují robotu sledovat jeho vnitřní stav. První veličinu, kterou je nutno sledovat je úhel natočení a tím pozici kloubu. Ten nám umožní sledovat absolutní rotační snímač, který vydává množinu binárních hodnot, které bude snazší zpracovat. Po výpadku napájení je schopen uložit poslední hodnotu, a tak po restartu není nutné složité seřizování. [20].

Na trhu bohužel nejsou senzory, které by se v tomto návrhu daly využít. Firmy s modulárními roboty tento problém řeší vývojem senzorů přímo na míru pro jejich potřeby. V návrhu jsou proto vytvořeny prostory v případě dalšího pokračování a vývoje těchto prvků.

8.8 Volba řídicí jednotky

Řídicí jednotka je mozek celého robota, který zpracuje zadanou úlohu, podle které pak předává signály jednotlivým kontrolérům, které podle nich pak řídí jednotlivé prvky ramene. Zároveň sbírá data ze senzorů a na základě nich může provádět změny chodu.

Jelikož v této práci jsou senzory a kontroléry řešeny pouze teoreticky, není dostatečné množství informací k výběru takové jednotky. Ta je však nedílnou součástí každého ramene, a tudíž bude zohledněna v ekonomickém zhodnocení průměrnou cenou pro roboty podobných parametrů.

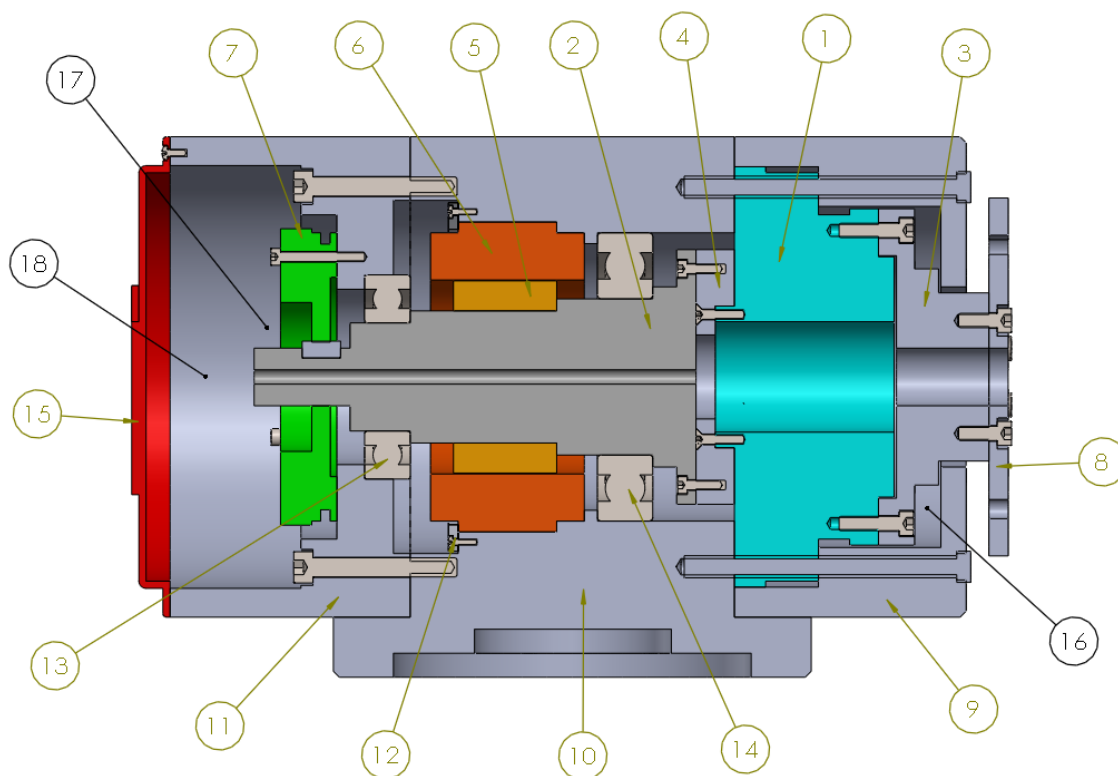
8.9 Popis mechanismů

V obrázku 22) je znázorněn řez osou rotace modulu číslo 1. Hlavním prvkem je momentový bezrámový motor od firmy Kollmorgen. Rotor motoru (5) je zalisován na hřídeli (2), který je připevněn na vstupní přírubu harmonické převodovky (1) přes redukci montážního průměru. Na stejném hřídeli (2) jsou zalisovaná kuličková ložiska 6213 (14) a 6209 (13).

Zvýšený výsledný moment je přenášen hřídelem (3) z výstupní příruby harmonické převodovky (1), šrouby s vnitřním šestihranem. Tento hřídel již nevyžaduje další ložisko a na konci je spojen s výstupní přírubou (8), kterou se bude realizovat spojení s dalším modulem nebo propojovacím prvkem pomocí šroubů s šestihrannou hlavou.

Elektromagnetická brzda (7), která bude nejvíce využita pro dlouhé držení poloh ramene je umístěna konci hřídele (2) a její pohyblivá část je s ním spojena pomocí pera 8x7. Nepohyblivá část brzdy je spojena šrouby k části těla na pozici (11), které je spojeno s ostatními částmi těl (10), (9) a krytkou kontroléru (15).

Z důvodu absence vhodných elektronických komponent na trhu je pro ně vymezen pouze prostor v místě kde by byly teoreticky využity. Senzorům úhlu natočení byly vyčleněny pozice (16) a (17). Dále by bylo vhodné využít senzor výsledného kroučícího momentu, a to na pozici (16). Kontrolér pohonu, který by převáděl informace z řídicí jednotky na signál pro stator motoru, odpovídá pozici (18).

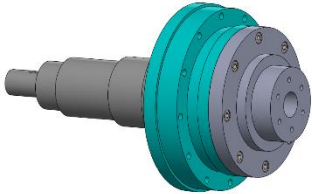
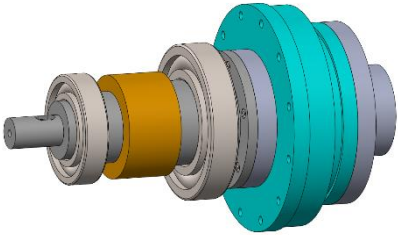
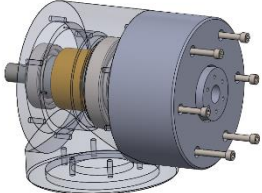
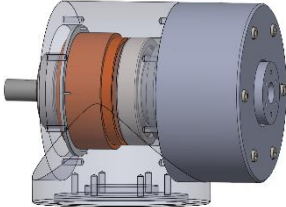

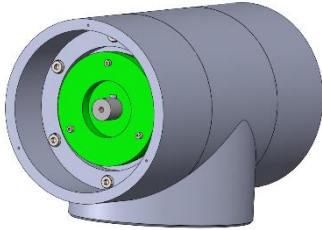
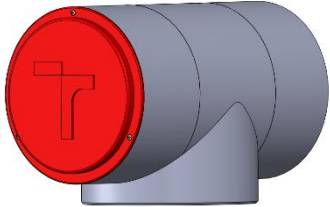
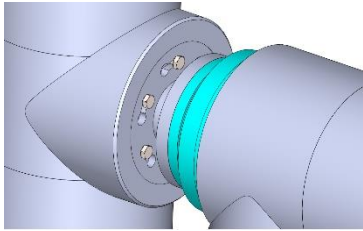


Obr. 24) Řez modulem č. 1

8.10 Popis montáže modulu

Výsledné konstrukční řešení bylo vytvořeno s ohledem na smontovatelnost jednotlivých modulů, tak i celého robotického ramena. Celý modul se skládá ze tří hlavních částí, to proto aby při výměně vadných komponent nebylo potřeba rozebrání celého modulu.

Tab 14) Jednotlivé kroky montáže modulu č. 1

<p>1. Spojíme redukci (4) se vstupní přírubou harmonické převodovky (1) a poté s hřídelem (2), hřídel (3) s výstupní přírubou.</p> 	<p>2. Na hřídel (2) nalisujeme příslušná ložiska (13), (14) a rotor motoru (5).</p> 
<p>3. Zasadíme vytvořenou část do první (9) a druhé (10) části těla modulu a spojíme šrouby M8x130</p> 	<p>4. Umístíme stator motoru (6) na pozici a zajistíme axiální posun pomocí aretačního kroužku (12).</p> 
<p>5. Spojíme výstupní přírubu (8) s hřídelem (3).</p> 	<p>6. Připojíme nepohyblivou část brzdy (7) k tělu modulu (11) a pomocí pera 8x7 spojíme pohyblivou část brzdy (7) s hřídelem (2).</p> 
<p>7. Modul zakončíme přiděláním koncovky (15) k tělu modulu</p> 	<p>8. Jednotlivé moduly spojíme zasunutím šroubů s šestihrannou hlavou do výstupní příruby (8), otočením do koncové polohy o 20° a dotáhnutím šroubů.</p> 

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola je zaměřená na přibližné stanovení ceny takto zkonstruovaného robota, která byla odhadnuta na 538 100,- Kč. Takto vysoká je z důvodu použití velmi drahých servomotorů a harmonických převodovek, které se vyskytují v každém modulu. Například přibližná cena modulu č. 1 by se pohybovala okolo 110 000,- Kč.

Modulární koncepce robotických ramen se nejvíce využívá kvůli možnosti její sériové výroby, tím by se snížila cena zejména výrobních součástí. V případě vývoje vlastních pohonů a převodovek by cena mohla klesnout až o desítky procent a robotické rameno by tak mohlo konkurovat ostatním robotickým ramenům na trhu, aktuální cena spíše odpovídá ceně prvního prototypu.

Tab 15) Ceny jednotlivých dílů

Název dílu	Počet kusů	Cena za kus
TBM-12941-A	2	24 000,- Kč
TBM-7631-B	2	11 000,- Kč
TBM-6025-B	2	22 000,- Kč
LHS-III-40-80	2	65 000,- Kč
LHS-III-20-50	2	38 000,- Kč
LHS-III-17-100	2	32 000,- Kč
Brzdy BXR	6	2 600,- Kč
Hřídele	12	500,-Kč
Kontroléry motorů	6	8 400,- Kč
Odlitky těl modulů	6	4 500,- Kč
Řídící jednotka	1	50 000,- Kč
Ložiska		4100,- Kč
Spojovací materiál		1000,- Kč
Cena celkem		538 100,- Kč

10 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Bakalářská práce řešila dva problémy. Prvním problémem bylo stanovení vstupních parametrů a řešení výpočtů ramena. Vstupní parametry byly vybrány na základě průzkumu trhu. Klíčovými výpočty bylo řešení výkonů pohonů, parametry harmonické převodovky a teoretické zatížení hřídele. K tomu bylo využito zejména knihy Průmyslové roboty a manipulátory [4].

Druhým problémem bylo převedení vypočtených hodnot do návrhu konstrukce. Ta se celá odvíjela od srdce celého modulu, čímž je motor. Z tohoto bodu se pak postupně přecházelo na další komponenty v řetězci. Po celkové optimalizaci pak vznikly výsledné moduly, které se kromě velikostí liší v drobných detailech, ty vznikly konstrukční optimalizací každého modulu. Ve druhém modulu byla vytvořena redukce pro spojení dvou těl, a to z důvodu malého průměru korunního kola harmonické převodovky a velkého průměru kuličkového ložiska. Redukce, která spojuje hřídel se vstupní přírubou harmonické převodovky je ve třetím modulu napojena se vstupní přírubou v radiálním směru. To je z důvodu napojení, které je dáno výrobcem.

10.1 Možné pokračování

Bakalářská práce řeší pouze konstrukční řešení a teoretickou přípravu pro elektronické komponenty v sestavě. Jako další možnost pokračování je vývoj jednotlivých senzorů, kontrolérů a popřípadě i řídicí jednotky přímo pro toto robotické rameno.

Ve výpočtové části jsou použity koeficienty prvotního návrhu. V případě výroby jednoho modulu, by mohly proběhnout zatěžovací experimenty a korekce těchto koeficientů. To by vedlo k drobným úpravám modulů a zpřesnění celého ramene.

10.2 Využití v praxi

Jako primární využití je v laboratorních podmínkách, kdy robotické rameno může být sestaveno každému experimentu na míru a posléze přestaveno.

Podstatnou výhodou je snížení nákupní ceny a přímé řešení robota pro zákaznickou technologickou operaci. To by mohlo vést ke zvýšení automatizace v malých podnicích.

11 ZÁVĚR

Cílem této práce byl návrh konstrukce tří velikosti modulů robotického ramena, jejichž spojením by vytvořily pohonnou část víceosého robota.

Práce začíná úvodem do problematiky robotiky, jak vznikaly první roboty, jaká je definice robotů a jaký je význam využívat roboty v dnešním světě.

Kapitola průmyslový robot je podrobná rešerše v oblasti robotických ramen. Jako první jsou uvedeny rozборы dělení robotů a jejich podrobné charakteristiky, na základě některých těchto charakteristik se pak vychází v konstrukční části práce. Nejdůležitější částí této kapitoly jsou pohony, převody a pohybové jednotky, kde jsou popsány využívané konstrukční prvky. Jako poslední v této kapitole jsou dostupná modulární řešení robotických ramen na trhu, kde jsou využity informace z předchozí části práce.

V kapitole šest jsou vytvořeny dvě návrhové varianty, kde jsou popsány vybrané mechanismy a konstrukční části. Každá varianta obsahuje také popsání výhod a nevýhod, které jsou v další části zohledněny. Na tuto kapitolu navazuje multikriteriální analýza, pro kterou bylo vybráno osm hodnocených parametrů. Po přiřazení váhy jednotlivým parametrům a obodováním vytvořených variant bylo dosaženo výsledku, kde varianta číslo dvě získala většího procentuálního zisku.

Osmá kapitola se zabývá výpočty a konstrukcí modulů. V první řadě byly zvoleny vstupní parametry na základě rozboru trhu. Nejdůležitějšími parametry je nosnost ramena, která je 5 kg a dosah ramena, který byl zvolen 1600 mm. Dále pak následují výpočty, které byly nezbytné, jako např. výpočet výkonu pohonu a převodový poměr zvoleného reduktoru otáček. Tato kapitola také obsahuje popis celého mechanismu modulu, kde jsou všechny použité prvky zobrazeny v řezu. Kapitola končí popisem montáže. Modelování robotického ramena bylo provedeno v programu Solidworks 2020 a výkresová dokumentace v programu AutoCAD Mechanical 2019.

V poslední kapitole je vytvořeno základní ekonomické zhodnocení celé konstrukce, přibližná cena byla stanovena na asi 530 tisíc korun.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLÍBAL, Zedeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] CHVÁLA, Břetislav, Robert MATIČKA a Jaroslav TALÁCKO. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03.00361-X.
- [3] ŠTEFAŇÁK, Peter. *Analýzy a syntéza struktur mechanizmů pohonů a robotů*. Bratislava: Veda, 1989. ISBN 80-224-0022-X.
- [4] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [5] IRB 1100. *ABB* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-1100>
- [6] Řada M-3. *FANUC* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%a1nka-filtru-robot%a5%af/%a5%99ada-m3>
- [7] Schéma planetového převodu. *Pinterest* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://br.pinterest.com/pin/759560293385228506/?lp=true>
- [8] Strain Wave Gear Principle. *Harmonic Drive* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology>
- [9] IRB 1200. *ABB* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1200>
- [10] YuMi. *ABB* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/yumi>
- [11] Cyclo Drives. *Shi* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.shi.co.jp/english/products/component/cyclo/index.html>
- [12] KR Iontec. *KUKA* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/kr-iontec>
- [13] Cykloidní převodovky. *Opis* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://opis.cz/prevodovky-bonfiglioli/>
- [14] Aubo i3. *AUBO* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.aubo.cz/produkty/aubo-i3/>
- [15] Robot. *Search Enterprise AI* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/robot>
- [16] TMB Series. *Kollmorgen* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/direct-drive/tbm-series/>
- [17] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [18] KALÁB, K. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: části spojovací*. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1290-8.
- [19] Elektromagnetické spojky a brzdy, brzdové motory. *Coroll* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.coroll.cz/elektromagneticke-spojky-a-brzdy-brzdove-motory.html>

- [20] Enkodér. *Encodersensor* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <http://cz.encodersensor.com/>
- [21] SZABARI, M. *Konstrukce kráčejícího mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kočíš.
- [22] Kompaktní prstencové motory. *Raveo* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: https://www.raveo.cz/sites/default/files/download/2015/04/TBM-Kompaktni_prstencove_motory.pdf
- [23] Servomotors. *Rozum* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://rozum.com/servomotors/>
- [24] Elfin E5. *All robots* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.allrobots.cz/produkty/hans-robot/elfin-e5/>
- [25] Harmonické převodovky. *Raveo* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/prevodovky/harmonicke-prevodovky>
- [26] ALBU-SCHAFFER, A., A. STEMMER, Ch. OTT, S. HADDADIN, G. HIRZINGER a T. WIMBOCK. *The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1014788>

13 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

13.1 Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam	Jednotka
3D	trojrozměrný	[-]
a	konstanta kuličkových ložisek	[-]
AC	střídavé napětí	[-]
BP_i	body parametru hodnocení	[-]
C_i	základní dynamická únosnost ložiska	[kN]
F_{1_A}	mezní síla v místě ložiska A	[N]
F_{1_B}	síla v místě ložiska B	[N]
F_{1_P}	síla v místě převodovky	[N]
g	tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
hod	hodina	[-]
i_i	převodový poměr	[-]
kg	kilogram	[-]
k_i	koeficient návrhu	[-]
L	základní trvanlivost	[hod]
L_i	vzdálenost mezi body na hřídeli	[mm]
l_{min}	minimální délka pera	[mm]
M_{Ci}	moment statického tření	[Nm]
M_{di}	dynamický moment při rozběhu	[Nm]
mm	milimetr	[-]
M_{ni}	moment nevyvážených hmot	[Nm]
M_{o_max}	maximální ohybový moment	[Nm]
m_{OM}	hmotnost OM	[kg]
MPa	megapascal	[-]
M_{Pi}	kroucí moment v místě převodovky	[Nm]
M_{Ri}	jmenovitý kroucí moment pohonu	[Nm]
M_{vi}	výsledný moment	[Nm]
N	newton	[-]
n_{iout}	výstupní otáčky příruby	[ot/min]
n_{ji}	jmenovité otáčky pohonu	[ot/min]
Nm	Newtonmetr	[-]
OM	objekt manipulace	[-]

ot/min	otáčky za minutu	[-]
P_i	parametr hodnocení	[-]
P_{min}	minimální výkon motoru	[W]
P_p	tlak mezi bokem drážky a perem	[MPa]
PR	průmyslový robot	[-]
rad	radián	[-]
r_i	poloměr pohybu OM	[m]
SMA	Shape Memory Alloys – slitiny s tvarovou pamětí	[-]
V	volt	[-]
VP_i	váha parametru hodnocení	[-]
W	watt	[-]
ε_i	výsledek multikriteriální analýzy	[%]
φ	maximální úhel přemístění OM	[rad]
ω_i	maximální rychlost přemístění OM	[rad/s]

13.2 Seznam tabulek

TAB 1)	TECHNICKÉ PARAMETRY MODULÁRNÍHO RAMENE ELFIN E532	
TAB 2)	TECHNICKÉ PARAMETRY MODULU RDRIVE 60	33
TAB 3)	VÁHY JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ A JEJICH ODŮVODNĚNÍ .	38
TAB 4)	HODNOCENÍ PARAMETRŮ VARIANTY 1	39
TAB 5)	HODNOCENÍ PARAMETRŮ VARIANTY 2	40
TAB 6)	CELKOVÉ HODNOCENÍ VARIANT	40
TAB 7)	VSTUPNÍ PARAMETRY	41
TAB 8)	SROVNÁNÍ KLÍČOVÝCH VÝSLEDKŮ VŠECH MODULŮ	42
TAB 9)	PARAMETRY ZVOLENÝCH POHONŮ [22].....	43
TAB 10)	HARMONICKÉ PŘEVODOVKY [25]	44
TAB 11)	ZVOLENÉ BRZDY [19].....	44
TAB 12)	SPLNĚNÍ MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ SÍLY V MÍSTĚ PŘEVODOVKY	47
TAB 13)	PŘEHLED PARAMETRŮ PRO VÝPOČET PER.....	48
TAB 14)	JEDNOTLIVÉ KROKY MONTÁŽE MODULU Č. 1	51
TAB 15)	CENY JEDNOTLIVÝCH DÍLŮ	52

13.3 Seznam obrázků

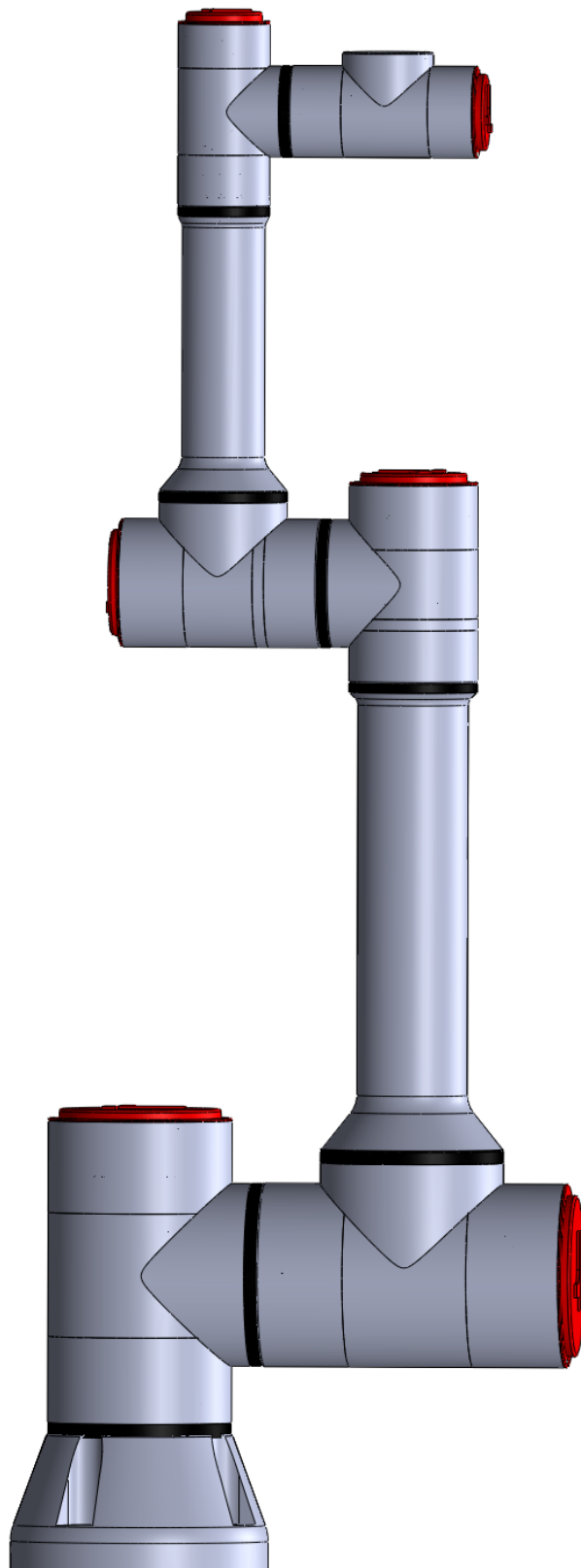
OBR. 1) ROZDĚLENÍ MANIPULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ [2]	18
OBR. 2) A) ABB IRB 1100 – SÉRIOVÝ ROBOT [5] B) FANUC M-3 – PARALELNÍ ROBOT [6]	19
OBR. 3) ABB PRŮMYSLOVÝ ROBOT IRB 1200 [9]	22
OBR. 4) KUKA KR 30 R2100 [12].....	23
OBR. 5) ABB KOOPERUJÍCÍ ROBOT YUMI 14000 [10].....	23
OBR. 6) AUBO I3 [14]	24
OBR. 7) PŘEVODOVKA HARMONIC-DRIVE [8]	27
OBR. 8) PLANETOVÁ PŘEVODOVKA [7].....	28
OBR. 9) SCHÉMA STAVBY CYKLOIDNÍ PŘEVODOVKY [13]	29
OBR. 10) KONCEPCE UPOŘÁDÁNÍ PŘÍMOČARÝCH VEDENÍ [4]	30
OBR. 11) DRUHY VODÍCÍCH PLOCH A) SOUSTŘEDNÉ PRVKY B) ROZDĚLENÉ PRVKY [1]	30
OBR. 12) ROTAČNÍ JEDNOTKY – A) OTOČNÝ STŮL S PŘÍMÝM NÁHONEM B) OTOČNÝ STŮL S PŘEVODEM C) POHON S POHYBOVÝM ŠROUBEM [1] 31	
OBR. 13) A) MODULÁRNÍ ROBOT ELFIN E5 B) DETAIL MODULU [24]	32
OBR. 14) MODULY RDIVE OD ROZUM ROBOTICS [23]	33
OBR. 15) MODEL ROBOTICKÉHO RAMENA LWR III [26].....	33
OBR. 16) KINEMATICKÝ ŘETĚZEC PR SE 6 STUPNI VOLNOSTI [4].....	34
OBR. 17) NÁVRHOVÝ MODEL VARIANTY 1	36
OBR. 18) NÁVRHOVÝ MODEL VARIANTY 2	37
OBR. 19) SCHÉMA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ [4]	41
OBR. 20) BEZRÁMOVÝ SERVOPOHON TBM [16]	43
OBR. 21) SCHÉMA UVOLNĚNÉHO HŘÍDELE.....	45
OBR. 22) RADIÁLNÍ ZATÍŽENÍ HŘÍDELE	46
OBR. 23) VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY MODULU Č. 1	47
OBR. 24) ŘEZ MODULEM Č. 1.....	50

14 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** – STEP model modulu č. 1
- Příloha 2** – STEP model modulu č. 2
- Příloha 3** – STEP model modulu č. 3
- Příloha 4** – Výkres sestavy modulu č. 1
- Příloha 5** – Výrobní výkres hřídele 1-1
- Příloha 6** – Výrobní výkres těla modulu 1-2

PŘÍLOHY

Sestava robotického ramena



Moduly robotického ramena

